Spektrum
DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

VOGELGRIPPE
WO BLEIBT DIE NÄCHSTE PANDEMIE?

Spektrum DER WISSENSCHAFT
4/08
APRIL 2008

ASTRONOMIE
Satellit Glast erforscht kosmische Gammastrahlung

KREBS
Wie Tumorzellen das Immunsystem missbrauchen

QUANTENPHYSIK
Die Parallelwelten des Hugh Everett

Aliens unter uns?

Gab es alternatives Leben auf der Erde?
Relikte einer 2. Urzeugung könnten noch existieren

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr.
D6179E

www.spektrum.de

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Klimapläne fernab der Realität

Konrad Kleinknecht ist ein erprobter Forscher. Über Jahrzehnte hat sich der Teilchenphysiker von der Universität Mainz am Cern-Beschleuniger bei Genf einer fundamentalen Frage gewidmet: Ist die Welt der Antimaterie das exakte Spiegelbild der uns geläufigen Welt der Materie? Das Thema berührt unsere Existenz wie kaum ein anderes. Denn die Tatsache, dass wir fast ausschließlich Materie im Kosmos vorfinden (und allein daraus bestehen), hat schon Anfang der 1960er Jahre beim russischen Theoretiker Andrej Sacharow den Verdacht geweckt, nur eine bestimmte Asymmetrie zwischen den Materiewelten könnte dieses Phänomen erklären. 1964 gab es dann die – mit Nobelpreisen belohnten – ersten Befunde, die auf winzige Abweichungen von einer exakten Spiegelsymmetrie hinwiesen.

An den raffinierten und langwierigen Experimenten zur weiteren Untersuchung dieser Frage war Kleinknecht am Cern maßgeblich beteiligt – mit dem Resultat, dass die Symmetrie zwischen den gespiegelten Materiewelten bei etwa zwei Promille aller Zerfälle einer bestimmten Elementarteilchensorte verletzt ist. Dann, im Jahr 2000, hatte der Teilchenphysiker ein erschütterndes Erlebnis. Er stand in Saas-Fee im Wallis vor den kümmerlichen Resten des Feegletschers, über den er noch als Student mit Seehundfellen unter den Skiern auf den Viertausender des Allalinhorns gestiegen war. Und später auf Grönland konnte Kleinknecht beobachten, wie der Jakobshavn-Isbræ-Gletscher mit vergleichsweise atemberaubendem Tempo – heute um 40 Meter pro Tag – ins Meer schliddert (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2008, S. 14).

Seitdem widmet sich Konrad Kleinknecht der Energie- und Klimaforschung. Für die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG) agiert er seit 2000 als Klimaschutz-Beauftragter. An den Zielen zur Senkung des Kohlendioxidausstoßes, wie sie die Bundesregierung derzeit verfolgt, stört ihn die offensichtliche Unehrlichkeit. Sie lägen, wie er für uns in seinem Beitrag schreibt, »fernab der Realität«. Also plädiert der Physiker für den stärkeren Ausbau alternativer Energien, aber auch, bis diese wirksam zum Klimaschutz beitragen, für die Verlängerung der Laufzeiten der vorhandenen Atomkraftwerke »als Übergangsenergie«.

Das ist in unserer ideologisierten AKW-Debatte politisch natürlich völlig inkorrekt. Mit Kritik rechnet der Mainzer Professor also. Er gibt sich realistisch: »Wenn den Leuten keine Sachargumente mehr einfallen, dann werde ich eben als Lobbyist bezeichnet.« Doch Kleinknecht nähert sich dem Problem nicht ideologisch, sondern analytisch. Und was den Lobbyisten angeht, versichert er: »Ich habe keine Verbindung zu irgendeinem Konzern, sondern nur zur DPG und meiner Universität.« Sein neuestes Buch über das Klimaproblem hat er jedenfalls seinen drei Enkeln gewidmet. Denn »sie müssen auslöffeln, was wir ihnen angerichtet haben« (S. 60).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

NYC
MAY 28 –
JUNE 1,
2008

The
egg
came
first.

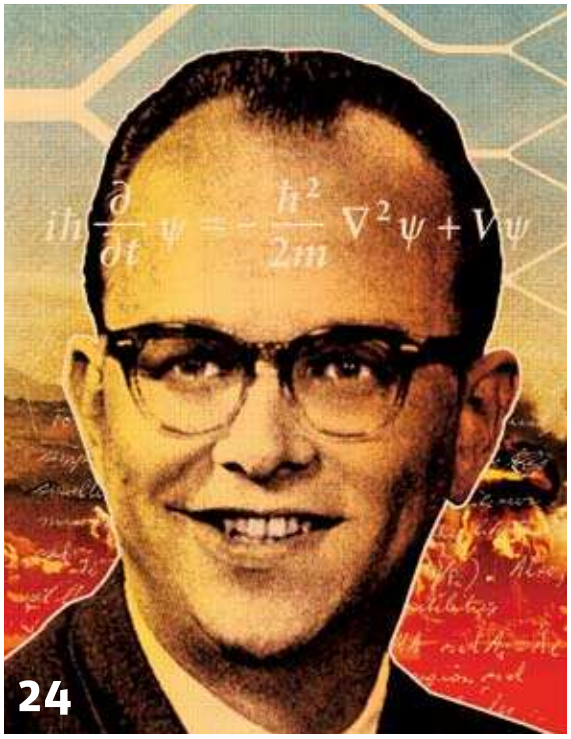
scienceiseverywhere.com

World™
Science
Festival

©2008 Science Festival Foundation. All Rights Reserved.

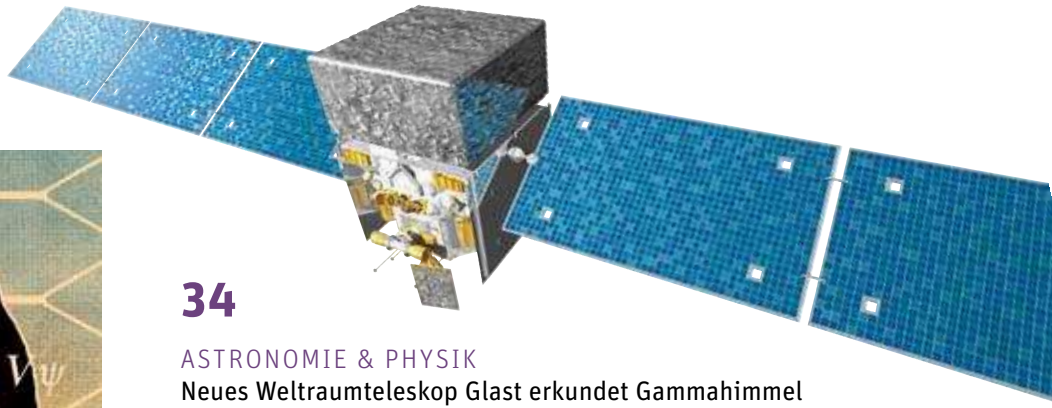
INHALT

APRIL 2008



24

ASTRONOMIE & PHYSIK Unendlich viele Welten



34

ASTRONOMIE & PHYSIK
Neues Weltraumteleskop Glast erkundet Gammahimmel

50

MEDIZIN & BIOLOGIE Bösartige Entzündungen

AKTUELL

10 Spektrogramm
Kleider unter Strom · Atomares Kräftemessen · Glitzernder Maya-Tempel · Schmerzfreie Nacktmulle u. a.

13 Bild des Monats
Superbeschleuniger in den Startlöchern

14 Mikroben mit riesigem Genreservoir
Eine eng verwandte Bakteriengruppe verfügt über fast so viele Gene wie der Mensch

16 Rechts oder links bei Lemuren 🔊
Auch bei Halbaffen ticken die Gehirne von Männchen und Weibchen anders

19 Gecko im Operationssaal 🔊
Ein Klebeband nach Gecko-Vorbild könnte Chirurgen die Arbeit erleichtern

20 Schalter für die Spintronik 🔊
Elektrisches Feld lässt den Spin von Elektronen in Halbleitern umklappen

22 Springers Einwürfe
Seitensprung bei Mensch und Maus

ASTRONOMIE & PHYSIK

24 ▶ Hugh Everetts Parallelwelten
Der brillante Quantenphysiker postulierte einst die Existenz multipler Universen. Inzwischen findet seine ungewöhnliche Theorie Anerkennung

32 Von »Vielen Welten« zur Quantendekohärenz?
Der Physiker H. Dieter Zeh kommentiert

34 ▶ Blick ins heiße Universum
Demnächst öffnet das Weltraumobservatorium Glast ein neues Fenster zum Universum. Es soll die Geheimnisse der Dunklen Materie lüften

MEDIZIN & BIOLOGIE

TITEL

42 Fremdes Leben unter uns?
Womöglich leben völlig fremdartige Organismen seit Urzeiten auf der Erde

50 ▶ Wie Krebs Immunzellen kapert
Tumoren können nur wuchern, indem sie das Immunsystem missbrauchen

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

58 Herzprothetik
Mechanische Pumpen überbrücken die Wartezeit bis zur Transplantation

Titelmotiv: Adam Questell

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter: www.spektrum.de/audio

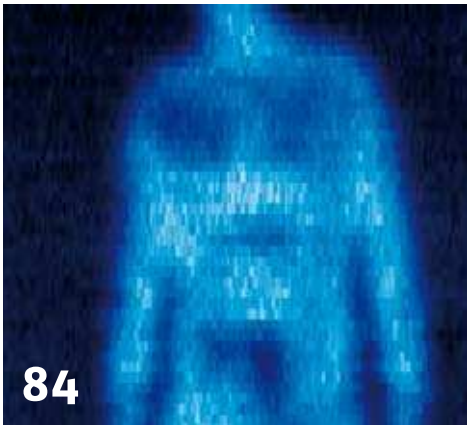
TITELTHEMA

Aliens auf der Erde? 42

60

ERDE & UMWELT

Kernkraft statt Kohle?



84

TECHNIK & COMPUTER

Mehr Durchblick mit Terahertzstrahlung

ERDE & UMWELT

60 Energie und Klimawandel
Es wird noch Jahrzehnte dauern, bis uns Wind, Wasser und Sonne wesentlich mit Energie versorgen können. Bis dahin gibt es zwei Möglichkeiten: den Bau Dutzender neuer Kohlekraftwerke oder die weitere Nutzung bereits laufender Kernkraftwerke

MENSCH & GEIST

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

65 Mathematische Kunst
Bericht über eine Ausstellung und Einladung: Senden Sie uns Ihre schönste algebraische Fläche

72 Ein echter van Gogh? Der optimierte Bioreaktor
Preisgekrönte Beiträge des Matheon-Journalistenwettbewerbs

ESSAY

78 ▶ Wo bleibt die Pandemie?
Die Vogelgrippe macht keine Schlagzeilen mehr, doch die Gefahr besteht weiter

TECHNIK & COMPUTER

84 Vorstoß in die Terahertzlücke
Mit Terahertzwellen lassen sich die Pistole unter der Jacke ebenso wie Materialfehler bei der industriellen Produktion erkennen – oder Hinweise auf bestimmte Moleküle im Universum finden

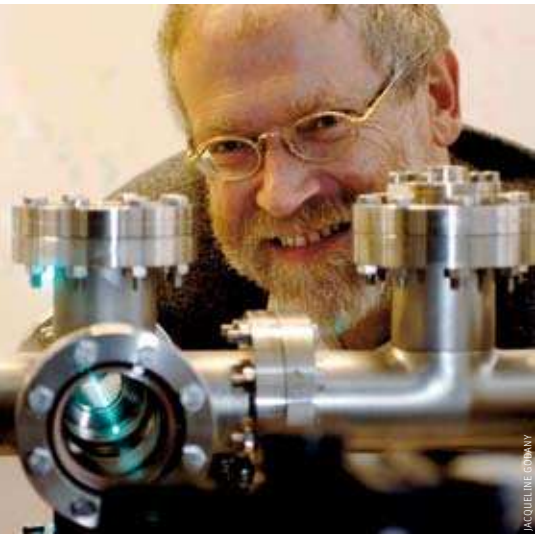
WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial: Klimapläne fernab der Realität
8 Leserbriefe
9 Impressum
83 Im Rückblick
98 Vorschau

94 Rezensionen:
Ludger Bollen *Der Flug des Archaeopteryx*
Karl Wulff *Naturwissenschaften im Kulturvergleich*
Augustus Brown *Warum Pandas Handstand machen*
Ernst Peter Fischer *Der Physiker*

ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf www.spektrum.de. Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!



TIPPS Anton Zeilinger zum Hören
www.spektrum.de/talk

www.spektrum.de

Willkommen auf den Internetseiten von Spektrum der Wissenschaft!

spektrumdirekt

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Rein ins Museum!

Wissenschaft ist langweilig und bestimmt kein Wochenendvergnügen? Von wegen: Viele spannende Ausstellungen präsentieren Neues, Altes und vor allem Wissenswertes. Manches davon haben sich die Kolleginnen und Kollegen von **spektrumdirekt** selbst angesehen:
www.spektrumdirekt.de/ausstellungen

Raus in die Kälte!

Von Revolutionären der Polarforschung bis zum Eisschwund in der Antarktis: Das **spektrumdirekt**-Dossier zum Polarjahr 2007/2008 erzählt Abenteurergeschichten, stellt Forschungsergebnisse vor und zeigt die Schönheit von Arktis und Antarktis ebenso wie deren Gefährdung
www.spektrumdirekt.de/polarjahr

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Anton Zeilinger zum Hören

Spektrum TALK

Der berühmte Quantenphysiker, der die Rätsel der Quantenwelt auf experimentellem Weg erforscht und den Michael Springer für unsere Märzausgabe interviewt hatte, gab uns nun auch die Gelegenheit zu einem zweiten Gespräch. Hören Sie ihm zu:
www.spektrum.de/talk

Wunderwelten im Wassertropfen

Was ist das eigentlich, was da alles durch einen Tropfen Tümpelwasser krabbelt? Pedro Galliker stellt uns in seinem Buch »Abenteuer Mikrowelt« die winzigen Teichbewohner als faszinierende, ja beinahe liebenswerte Geschöpfe vor. Hier finden Sie die Rezension von Anna Siever und können das Buch auch selbst bewerten:
www.spektrumdirekt.de/artikel/941326

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

30 Jahre Spektrum – mitmachen und gewinnen!

Zur Feier unseres Jubiläums im November 2008 laufen die ersten Vorbereitungen. Machen Sie mit und gewinnen Sie einen Einkaufsgutschein im Wert von 100 Euro!
www.spektrum.de/jubilaeum

Für Querdenker und Querleser

WISSENSlogs

Sie bloggen über alles Mögliche oder über das ganz Spezielle. Sie sind Klimaforscher oder Quantenexperimentator, Mathematiker oder Biologin. Und sie laden ein zur Debatte. Diskutieren Sie mit auf unserem Blogportal im Internet
www.wissenslogs.de

FÜR ABONNENTEN »Gesunde Ernährung leicht gemacht«

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

»Das achte Weltwunder«

www.epoc-magazin.de/artikel/945371

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

»Gesunde Ernährung leicht gemacht«

Jeder möchte sich gesund ernähren. Aber wie kann man sich im Dschungel widersprüchlicher Studienergebnisse und Empfehlungen zurechtfinden? Und wie lässt sich am besten abnehmen und das neue Gewicht auch halten?

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

*Ausgewählte Artikel aus **epoc** und **Gehirn&Geist** kostenlos online lesen*

»Das achte Weltwunder«

Vor 125 Jahren wurde in New York die Brooklyn Bridge eingeweiht. Ihr Bau kostete manchen das Leben – auch ihren deutschstämmigen Konstrukteur Johann August Röbling

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **EPOC** UNTER

www.epoc-magazin.de/artikel/945371

»Im Himmel haben alle Flügel«

Wie denken Kinder über den Tod? Manche meinen, er sei ein böser Mann und man könne sich vor ihm verstecken. Erst allmählich begreifen sie, dass jeder Mensch sterben muss – und niemand zurückkehrt

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

www.gehirn-und-geist.de/artikel/945357

Spektrum.de

Heftarchiv
www.spektrum.de/archiv

Spektrum Notizen
www.spektrum.de/notizen

Spektrogramm
www.spektrum.de/spektrogramm

Spektrum Tagebuch
www.spektrum.de/tagebuch

Spektrum zum Hören
www.spektrum.de/hoeren

Spektrum in die Schulen
www.spektrum.de/wis

Der Mathematische Monatskalender
www.spektrum.de/monatskalender

Leserbriefe
www.spektrum.de/leserbriefe

Newsletter
www.spektrum.de/newsletter

Unvermeidlicher Kollaps

Im Wirbel der Beschleunigungsspirale, Essay, Februar 2008

Vielen Dank für die kluge und realistische Gesellschaftsanalyse von Hartmut Rosa. Ihm ist darin zuzustimmen, dass die eigentliche Triebfeder der ständigen technischen und gesellschaftlichen Geschwindigkeitssteigerung der Moderne das Verlangen der Menschen nach Intensivierung ihres Lebens ist. Letztlich ist es die unersättliche menschliche Lebensgier, die hinter den von Rosa analysierten Phänomenen steht.

Allerdings ist sie keineswegs, wie Rosa formuliert, die »moderne Antwort auf den Tod«, sondern es ist eine Antwort, die zu allen Zeiten gegeben worden ist. Diese Antwort ist geradezu eine anthropologische Konstante. Sie unterliegt nicht dem Gesetz des Wandels und der Beschleunigung. Man lese nur die »Satyrica« des Petronius oder besichtige das der Öffentlichkeit zugängliche »Geheimkabinett« des Nationalmuseums in Neapel. Dort sind Fundstücke aus Pompeji und Herculaneum ausgestellt, die die enge Verbindung von Todesbewusstsein und zügelloser Lebensgier ungeschminkt und drastisch darstellen. Anders geworden gegenüber den Zeiten Roms ist nicht die Gier als Haupttriebkraft der Gesellschaft, sondern sind allein die größeren technischen und ökonomischen Möglichkeiten der Menschen.

Recht hat Rosa auch in der These, dass die Beschleunigungsspirale eines Tages im Kollaps enden wird. Allerdings erkennt er, wenn er von Ökokollaps, klimatischen oder nuklearen Katastrophen und Pandemien spricht, nicht, dass der Kollaps in Gestalt der die gesamte moderne Welt in ihrer Substanz bedrohenden demografischen Katastrophe längst begonnen hat.

Das kann auch gar nicht anders sein: In einer Gesellschaft, in der alles immer schneller zu Gewinn und Lebensgenuss führen muss, sind Kinder ein Störfaktor: Das »Kapital« und die »menschlichen Ressourcen«, die man in Kinder »investieren« muss, führen frühestens nach 20 Jahren zu einem finanziellen »Return«. So lange wollen in einer Zeit der wirbelnden Beschleunigungsspirale immer weniger Menschen warten.

Reiner Vogels, Swisttal-Odendorf

EGDIGITAL / ISTOCKPHOTO; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Eine ständig wachsende Zahl von Autos führt heute schon oft zum Kollaps.

Viele Aussagen sind keineswegs geklärt

Klimawandel als komplexes System, Leserbriefe, Februar 2008

Im Leserbrief von Herrn Löhr finden sich Fehler, die teils wissenschaftliche Unkenntnis über seit Jahren bekannte Tatsachen belegen.

Er schreibt: »Die unterjährigen Schwankungen des CO_2-Haushalts mit den Jahreszeiten sind größer als die langjährigen Zuwächse.« Korrekt wäre: »größer als die jährlichen Zuwächse im langjährigen Mittel«. Das ist natürlich nicht dasselbe.

Er schreibt: »(Immer noch) folgt jedes Jahr der Winter dem Sommer.« In Hannover, wo ich wohne, haben wir seit einigen Jahren meistens keinen Winter mehr, sondern Aprilwetter von November bis März.

Er schreibt: »Ein höherer CO_2-Gehalt führt zu schnellerem Pflanzenwachstum.« Dies gilt nur innerhalb gewisser Grenzen. Eine darüber hinausgehende CO_2-Zunahme verschlechtert sowohl das Pflanzenwachstum als auch die Nährstoffqualität der Pflanzen.

Er schreibt: »Ein höherer Wassergehalt der Atmosphäre ermöglicht Wachstum auch in trockenen Bereichen der Erde …, wodurch wiederum CO_2 gebunden wird.« Glaubt Herr Löhr etwa, dass die Sahara »feuchter« wird? Hier verwechselt er einen globalen Durchschnitt mit den Auswirkungen auf ein lokales Klima.

Er schreibt: »Eine höhere Temperatur (führt) zu schnellerem Pflanzenwachstum.« Dies gilt nur für höhere Breitengrade. Berechnungen zufolge zieht bereits eine Zunahme der Durchschnittstemperatur um 0,2 oder 0,3 Grad in den USA gravierende Ernteeinbußen nach sich.

Bislang war es in der Tat so, dass ein großer Teil des vom Menschen verursachten CO_2-Ausstoßes vom Meer aufgenommen wurde. Es gibt aber bereits Anzeichen dafür, dass die maximale Aufnahmekapazität der Meere langsam erreicht wird.

Jörg Michael, Hannover

Antwort von Prof. Löhr:
Die genannten Aussagen zum Pflanzenwachstum, zur Niederschlagsprognose, zu den Vegetationsgebieten und zur Rolle des Planktons sind keineswegs geklärt, sondern Gegenstand laufender Untersuchungen. Derzeit lassen sich sowohl Hypothesen finden, die aus Klimawandel und Erderwärmung eine »grünere« Welt ableiten (prähistorisch und biophysikalisch begründbar) oder eben eine »wüstere« Welt (situativ und lokal begründbar). Eine kontroverse Zusammenstellung findet sich im Internet unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Kontroverse_um_die_globale_Erwärmung.

Es ist ein Problem komplexer Systeme, dass verlässliche Urteile zwischen persönlichen Eindrücken (zum Beispiel zum örtlichen Wetter) und allgemeinen Naturgesetzen (beispielsweise zum Zusammenhang von Temperatur, Feuchtigkeit und Stoffwechsel) schwer zu fällen sind. In der Literatur lassen sich dann entsprechend widersprüchliche Vorhersagen finden (etwa zu Vegetationsausbreitung, Dürren, Ernteprognosen). Aus diesem Informationsangebot nur diejenigen auszuwählen, welche das eigene Urteil stützen, ist sicherlich notwendig bei einem forschen Entschluss (wie für einen Projektantrag), zeugt aber kaum von wissenschaftlicher Umsicht (zum Beispiel bei einer Problemanalyse). Insofern finde ich es hilfreich, wenn jemand seinen Entschluss gut mit entsprechenden Untersuchungsergebnissen belegen kann – aber ich empfehle eine skeptische Umsicht, wenn man ein Thema wirklich verstehen, klären und weiterentwickeln will.

Die Jugend kam aus Troja

»Wie Frösche um einen Teich« Januar 2008

»›Die zackigen Zähne der Anker fesseln die Schiffe … und mutig schwingt sich die Jugend … auf die hesperische Erde hinaus.‹ So schilderte der römische Dichter Vergil … die Ankunft der ersten Griechen in Italien.« Schreibt in seinem Beitrag zur großen Kolonisation der Griechen Theodor Kissel, der es – das unterstelle ich einfach – sicher besser weiß. Aber warum dann in einer Zeitschrift, die sich »Spektrum der Wissenschaft« nennt, solch eine gravierende Ungenauigkeit? Und warum bemüht er Vergil, den großen römischen Dichter (der es eigentlich nicht verdient hat, als Zeuge für Falsches herzuhalten)? Homers Odyssee, die eigentliche Entdeckungssage, bietet genügend schöne Stellen für die Erkundung des Mittelmeerraums durch die Griechen.

Die Jugend, die so mutig von der hesperischen Erde Besitz ergreift, kommt in Vergils kunstvollem Epos, wie (fast) jeder weiß, natürlich aus Troja. Auf der Flucht aus Troja in der Nordwestecke Kleinasiens und in der Zeit, von der Vergil erzählt, von Griechen der Sage nach besiegt und zerstört, aber kaum schon besiedelt.

Dr. Helmo Hesslinger, Fronreute-Staig

Antwort des Autors Theodor Kissel:
In der Tat stammt die in Vergils »Aeneis« erwähnte »entflammte Jugend« aus Troja, warum also habe ich die Schilderung ihrer Landung in Italien zur Illustration der Ankunft griechischer Kolonisten verwendet? Zu bedenken ist der ideologische Hintergrund des Werks, Vergil verfolgte mit seinem Nationalepos ein Ziel: Roms Bestimmung zur Beherrschung der Welt und des Kaiser Augustus Berufung als Herrscher über dieses Imperium aufzuzeigen. Dazu verwob Vergil Historisches und Legendenhaftes. Aeneas kam dabei eine Schlüsselrolle zu, denn er galt sowohl als Stammvater der Römer – Romulus und Remus waren seine Nachkommen – als auch als direkter Vorfahr des julischen Herrschergeschlechts. So weit, so bekannt.

Wenig beachtet wurde bislang, dass Vergil Roms Bedeutung meines Erachtens auch in der Übernahme griechischer Kultur verankerte. Sie bildete den Kitt, der die Völker des Imperiums einte. Dies war dem Dichter wohl bewusst, denn er verlieh seinem trojanischen Helden Aeneas einen griechischen Anstrich: Dieser gründete auf Sizilien die Stadt Acesta (später Segesta) gemeinsam mit einem örtlichen König.

Nicht anders als ein Städtegründer der in meinem Artikel beschriebenen griechischen Kolonisation ließ Aeneas Vergil zufolge dort einen Teil seiner Gruppe zurück, bevor er weitersegelte. Natürlich gibt es auch in Homers »Odyssee« Stellen für die Erkundung des Mittelmeerraums durch die Griechen, aber nur eine, die auf die Anlage einer Apoikie Bezug nimmt – die im Artikel erwähnte Insel Scheria. Der griechisch-römische Trojaner Aeneas Vergil'scher Zeichnung lieferte da doch einen anschaulicheren Einstieg. Übrigens: Die Einwohner Segestas standen zu Beginn des 1. Punischen Krieges den Römern zur Seite. Begründung: Sie seien Verwandte.

Briefe an die Redaktion …

… sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Errata

Läuten neue Nuklearsprengköpfe das Ende der Abrüstung ein? Februar 2008

Auf S. 102, linke Spalte, dritter Absatz, hat sich durch ein redaktionelles Versehen ein Fehler eingeschlichen. Der Satz muss richtig lauten: »Schon seit vielen Jahren ist das gesamte amerikanische Nuklearsenal daher mit elektronischen Sperren ausgestattet.«

Unsichtbar im Infrarot Spektrogramm, Februar 2008

Fälschlicherweise steht in diesem Beitrag: »Einen negativen Brechungsindex hat ein solches Material allerdings für Strahlung, deren Wellenlänge kleiner als die Hufeisen ist.« Es hätte heißen müssen: »… Strahlung, deren Wellenlänge ungefähr mit den Abmessungen der Hufeisen übereinstimmt.«

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels;
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3 – 5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Andrea Kamphuis, Dr. Rainer Kayser, Claus-Peter Sesín, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten.
Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an.
Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49;
München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01.12.2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2008 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

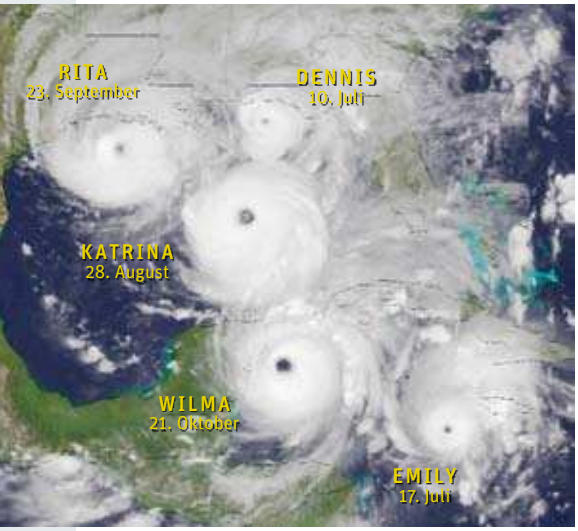
SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

KLIMA

Wärmere Meere, stärkere Stürme



UNIVERSITY OF WISCONSIN, CIMSS

Zusammengesetztes Satellitenbild der besonders schweren Hurrikane von 2005: Dennis, Emily, Katrina, Rita und Wilma

■ Schon lange sind sich die meisten Klimatologen sicher, dass hinter der Zunahme der Hurrikanaktivität in jüngster Zeit ein Anstieg der Meerestemperatur im Nordatlantik steckt. Allerdings beruhte diese Überzeugung bisher nur auf qualitativen Überlegungen. Nun haben Forscher vom University College in London erstmals auch quantitative Belege dafür geliefert.

Mark Saunders und Adam Lea konstruierten aus experimentellen Daten über Wassertemperaturen und Windfelder ein statistisches Modell, das die Schwankungen der Hurrikanintensität zwischen 1965 und 2005 zu 75 bis 80 Prozent reproduziert. Dann ließen sie die Windkomponente weg und konnten so ermitteln, welchen Beitrag die Temperatur der Meeresoberfläche allein leistet.

Demnach hat die Erwärmung des Nordatlantiks rund 40 Prozent der Zunahme in der Hurrikanaktivität zwischen 1996 und 2005 verursacht. Der Rest ging auf das Konto natürlicher Schwankungen in der Atmosphärenzirkulation wie dem Übergang der atlantischen multidekadischen Oszillation von ihrer jahrzehntelangen negativen in eine positive Phase.

Generell fanden die Forscher eine starke Empfindlichkeit der Hurrikanaktivität gegenüber Änderungen der Meerestemperatur. Schon eine Erwärmung um ein halbes Grad erhöht demnach die von Wirbelstürmen freigesetzte Energie um etwa 40 Prozent. Nachdem Klimamodelle gezeigt haben, dass der vom Menschen verursachte Treibhauseffekt die Meerestemperatur steigen lässt, belegen die Ergebnisse von Saunders und Lea nun, dass er dadurch auch für mehr verheerende Hurrikane sorgt. *Nature, Bd. 451 S. 557*

KULTURGESCHICHTE

Kanus, Kultur und Darwin

■ Der kulturelle Fortschritt kann nach ähnlichen Mechanismen ablaufen wie die biologische Evolution. Das hat der Biologe und Bevölkerungsforscher Paul R. Ehrlich jetzt anhand der Entwicklung von Kanus nachgewiesen. Er verglich Boote, die von zehn verschiedenen polynesischen Inselgruppen stammten. Dabei unterschied er funktionelle und schmückende Elemente. Die schmückenden Merkmale – Ornamente und religiöse Schnitzereien – variierten zwischen den Gesellschaften stärker als rein funktionelle wie die Form des Bugs. Demnach haben sie sich offenbar schneller verändert.

Die langsamere Entwicklungsgeschwindigkeit funktioneller Elemente lässt sich laut Ehrlich durch negative Auslese erklären. Diese Merkmale haben einen Selektionswert: Sie bestimmen, wie gut ein Boot in der Umwelt »überlebt«. Werden sie verändert, verschlechtert sich in der Regel die Funktion. Nur in seltenen Fällen kommt es zu einer Verbesserung, die sich dann allmählich durchsetzt. Schmückende Elemente haben dagegen keinen Selektionswert, sie können nach Belieben »mutieren«. Ähnlich verhält es sich bei Proteinen: Solche mit großer Bedeutung für die Fitness eines Lebewesens weisen eine besonders geringe Evolutionsrate auf.

Ehrlichs Ergebnisse lassen die kulturelle Evolution in einem neuen Licht erscheinen. Eine Theorie dafür hatten Wissenschaftler bisher für unmöglich gehalten. Menschliches Verhalten galt als zu komplex, als dass es vorhersagbaren Mustern folgen könnte. *PNAS Online-Vorabpublikation*

ZOOLOGIE

Ein Nacktmull kennt keinen Schmerz

■ Der Afrikanische Nacktmull *(Heterocephalus glaber)* ist eines der ungewöhnlichsten Säugetiere. Unbehaart, wechselwarm und blind lebt der 15 Zentimeter große Nager in Erdhöhlen. Nun ist er auch noch zum Indianer der Unterwelt avanciert; denn der Nacktmull kennt keinen Schmerz.

Schon vor einiger Zeit hatten Forscher um Gary R. Lewin vom Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin-Buch eine überraschende Entdeckung gemacht: Den Nacktmullen fehlen zwei Botenstoffe, die normalerweise Schmerzsignale an das Gehirn leiten. Bei neuen Versuchen zeigte sich nun, dass sie tatsächlich nicht auf bestimmte Schmerzreize reagieren. Starke Säuren lassen die Nager ebenso kalt wie das brennende Capsaicin in Chilipfeffer.

Wie das Team um Lewin feststellte, verfügen Nacktmulle aber sehr wohl über funktionsfähige Sinneszellen für die Schmerzwahrnehmung. Diese Nozizeptoren reagieren auch heftig auf das Capsaicin. Doch das Schmerzsignal kommt nicht an der zuständigen Stelle im Gehirn an. Anders bei Säuren: Hier werden die Nozizeptoren gar nicht erst aktiviert.

EWAN ST. J. SMITH, MAX-DELBRÜCK-CENTRUM BERLIN

Potthässlich und blind, erscheint der Nacktmull als Stiefkind der Natur. Doch dafür empfindet er keine Schmerzen.

Die Forscher führen die Schmerzunempfindlichkeit auf die Anpassung der Tiere an ihre extremen Lebensbedingungen zurück. So herrscht in den dicht besiedelten Höhlengängen äußerst schlechte Luft: Die Konzentration an Kohlendioxid ist so hoch, dass sie zu einer Daueraktivierung der Schmerzsensoren führen würde. Dem haben die Nacktmulle offenbar ebenso vorgebeugt wie dem Entzündungsschmerz, der durch Irritation der nackten Haut in den engen Erdlöchern verursacht würde.

PLoS Biology Bd. 6, Nr. 1, e13

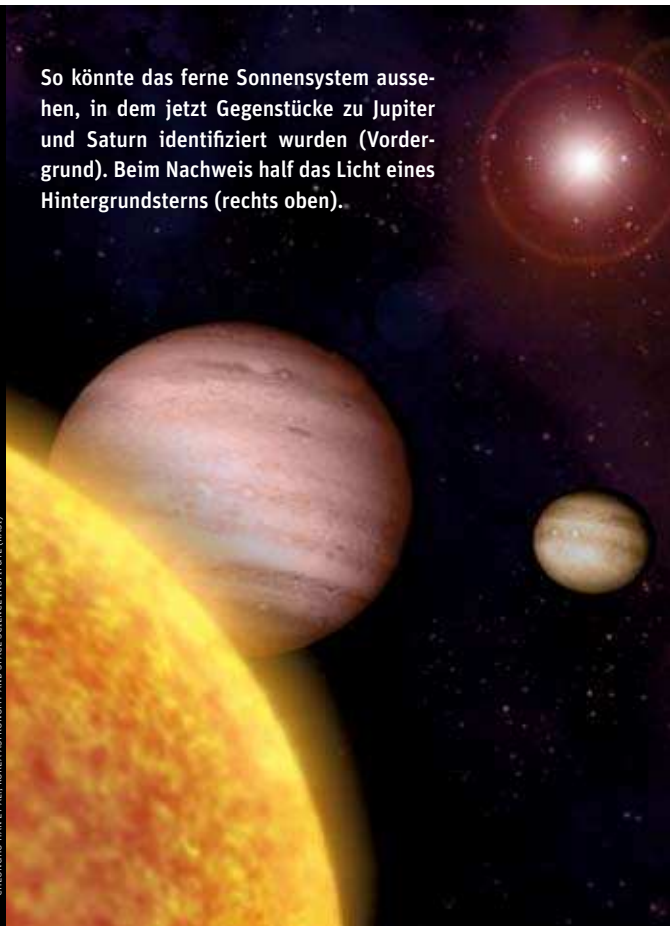
ASTRONOMIE

Sonnensystem im Kleinformat?

■ Den Aufbau rund 25 extrasolarer Planetensysteme haben Astronomen bisher genauer erkundet – doch keines davon ähnelt unserem eigenen. Nun ist es Forschern um Scott Gaudi von der Ohio State University in Columbus gelungen, immerhin ein Planetenduo in der Gewichtsklasse von Jupiter und Saturn aufzuspüren, das um einen Stern mit der halben Sonnenmasse rotiert.

Im Rahmen des »Optical Gravitational Lens Experiment« (Ogle) beobachteten die Wissenschaftler das Himmelsfeld in Richtung der Kleinen Magellanschen Wolke. Dort überlagerten sich Ende März 2006 zwei Sterne. Dabei erstrahlte der hintere wegen des Gravitationslinseneffekts durch den vorderen für einige Tage besonders hell. Mehrfach flackerte er sogar zusätzlich auf und verriet damit die Existenz der beiden Exoplaneten, die ebenfalls als Linsen wirkten und das Aufleuchten nochmals verstärkten, sobald sie den Hintergrundstern passierten.

Aus dem Aufflackern konnten die Forscher berechnen, dass der innere Planet knapp drei Viertel der Masse von Jupiter und der äußere neunzig Prozent derjenigen von Saturn hat. Obwohl der Bahnradius von beiden jeweils nur etwa halb so groß ist wie bei ihren solaren Gegenstücken, dürften auf ihrer Oberfläche wegen der schwächeren Sonne ähnliche Temperaturen herrschen. Die Forscher sind deshalb überzeugt, ein zweites Sonnensystem gefunden zu haben – und zwar im Minifomat. Ob es dort allerdings auch kleinere Planeten wie die Erde gibt, lässt sich selbst mit der empfindlichen Microlensing-Methode auf die große Entfernung nicht feststellen. *Science, Bd. 319, S. 927*



So könnte das ferne Sonnensystem aussehen, in dem jetzt Gegenstücke zu Jupiter und Saturn identifiziert wurden (Vordergrund). Beim Nachweis half das Licht eines Hintergrundsterns (rechts oben).

CHEONGHO HAN ET AL., KOREA ASTRONOMY AND SPACE SCIENCE INSTITUTE (KASI)

ARCHÄOLOGIE

Glitzernder Maya-Tempel

■ Die Maya verstanden es offenbar, ihre an sich schon imposanten Prachtbauten durch einen glimmerhaltigen Farbüberzug auch noch in der Sonne funkeln zu lassen. Das offenbart eine neue Analyse der Fassaden eines Tempels in Copán. Die in Honduras gelegenen Ruinen dieser Stadt, die ein bedeutendes Machtzentrum in der Spätphase der Maya-Kultur war, zählen heute zum Weltkulturerbe der Unesco und werden systematisch erforscht. Auf den Tempel stießen Archäologen schon im Jahr 1989 bei einer Untertunnelung der großflächigen Akropolis. Er war ungewöhnlich gut erhalten, weil die Maya ihn später überbaut hatten.

Die Rosalila, so der Name der Anlage, dürfte einst zu den größten Gebäuden der Stadt gezählt haben. Ihre aufwändig verzierten Fassaden bestanden aus weißem Gips, der großenteils rötlich bemalt war. Hinzu kamen vielfarbige maskenartige Ornamente.

Forscher um Rosemary Goodall von der Technischen Universität von Queensland in Brisbane (Australien) haben nun Farbrückstände an den Außenwänden mittels einer modernen Variante der Infrarotspektroskopie untersucht. Dabei stießen sie überraschend auf Überreste des Minerals Glimmer und eines weiteren glitzernden grünen Pigments. Der Tempel muss also einst noch prächtiger gewirkt haben als seine heutigen unterirdischen Überreste oder seine Nachbildung im Archäologischen Museum in Copán: Er funkelte im Sonnenlicht.

Pressemitteilung der Universität von Queensland

QUEENSLAND UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (QUT)

Nachbildung der »Rosalila« im Archäologischen Museum von Copàn. Wie jetzt entdeckt wurde, trug der unterirdische Originaltempel einen glitzernden Überzug aus Glimmer.

PALÄONTOLOGIE

Neue Saurier im Quartett

GASTON DESIGN INC. / UTAH MUSEUM OF NATURAL HISTORY

Der Entenschnabel weist den elf Meter großen und acht Meter langen *Velafrons coahuilensis* als harmlosen Pflanzenfresser aus.

■ Es war der kleinste bekannte Flugsaurier. Die Flügelspannweite von *Nemicolopterus crypticus* betrug gerade einmal 25 Zentimeter, während die Herrscher der Lüfte im Erdmittelalter ihre Schwingen bis zu zwölf Meter weit ausbreiten konnten. Trotzdem sehen Forscher um Xialin Wang von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in dem Reptil, das vor 125 Millionen Jahren in der chinesischen Provinz Liaoning lebte, einen frühen Vorfahren der späteren Riesen.

Wahrscheinlich hauste *N. crypticus* auf Bäumen – darauf deutet die ungewöhnliche Biegung der mittleren Zehenknochen hin. Demnach klammerte sich der Saurier mit seinen Krallen an die Zweige und schnappte von dort nach Insekten; denn Zähne hatte er keine.

Nicht nur darin unterscheidet er sich von zwei anderen Echsen, auf die Stephen Brusatte von der Universität Bristol und Kollegen kürzlich bei Ausgrabungen in der Sahara gestoßen sind. Beide waren am Boden lebende, acht Meter große Kolosse, die sich von Fleisch ernährten. Doch während der kurzschnauzige *Kryptos paliaos* die Beute mit seinen kleinen Beißern eher umständlich zerlegte, riss *Eocarcharia dinops* sein Opfer mit messerscharfen Zähnen förmlich auseinander.

Auf Pflanzenkost spezialisiert war dagegen der Vierte im Bunde der nun neu entdeckten Saurier: der bis zu elf Meter große und etwa acht Meter lange *Velafrons coahuilensis*, dessen 72 Millionen Jahre alte Überreste Paläontologen im mexikanischen Bundesstaat Coahuila fanden. Nicht zuletzt sein Entenschnabel verlieh dem Tier ein ausgesprochen harmloses Aussehen.

NANOTECHNIK

Atomares Kräftemessen

■ Mit einem Rasterkraftmikroskop als Werkzeug lassen sich einzelne Atome gezielt manipulieren und zu neuen Strukturen anordnen. Aber wie viel Kraft erfordert es, mit der Mikroskopspitze ein Atom oder Molekül auf einer Oberfläche zu verschieben? Das haben Wissenschaftler um Markus Ternes vom IBM-Forschungszentrum in San José (Kalifornien) nun erstmals direkt gemessen.

JENNY HUNTER, IBM

Ein Rasterkraftmikroskop mit einer Art Stimmgabel als Spitze diente zur Messung der Kraft, die zum Verschieben eines Atoms auf einer Oberfläche nötig ist.

Dazu bestückten die Forscher ihr Rasterkraftmikroskop mit einem so genannten qPlus-Sensor. Man kann sich darunter eine Art Stimmgabel aus Quarz vorstellen. Einer der beiden »Zinken« dient dazu, die Atome zu verschieben. Die mechanische Spannung zwischen seiner Spitze und der Oberfläche beeinflusst die Resonanzfrequenz der Gabel. Dadurch werden die zur Manipulation benötigten Kräfte messbar. Die Schwingungen erzeugen, da das verwendete Material piezoelektrisch ist, ein elektrisches Signal.

Zur Überraschung der Forscher erwies sich die für eine seitliche Verschiebung erforderliche Kraft als unabhängig davon, wie fest die Nadel auf die Oberfläche gedrückt wird. Entscheidend ist vielmehr die Art und Stärke der Wechselwirkung zwischen zu verschiebendem Objekt und Untergrund. So kostete es zehnmal mehr Kraft, ein Kobaltatom über eine Oberfläche aus Platin als über eine aus Kupfer zu bewegen. Derlei Kenntnisse sind wichtig für Anwendungen des Rasterkraftmikroskops in der Nanotechnologie.

Science, Bd. 319, S. 1066

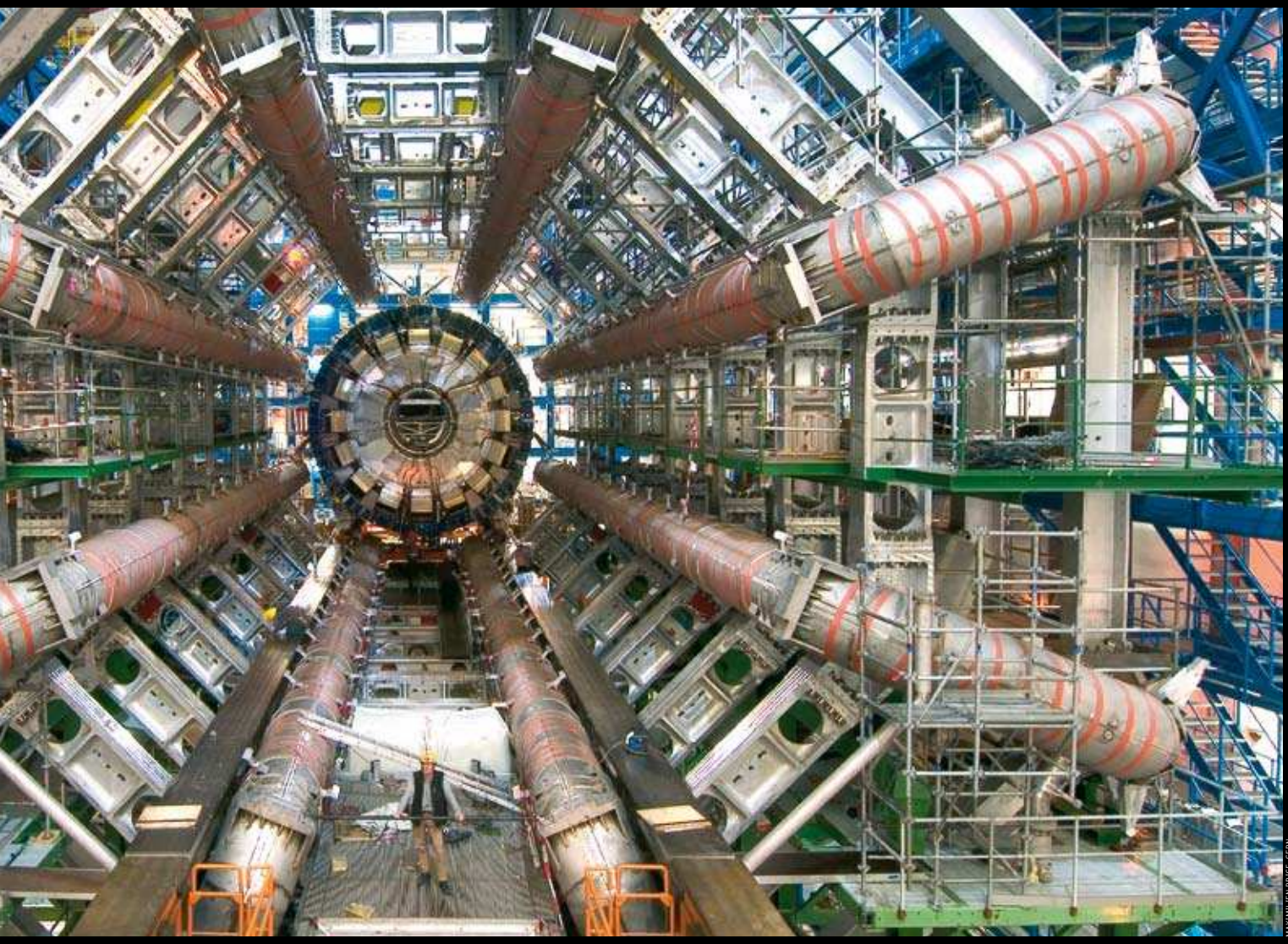
Superbeschleuniger in den Startlöchern

ENERGIETECHNIK

Kleider unter Strom

■ Den Strom für den Betrieb ihres MP3-Players können Jogger womöglich bald selbst produzieren. Forscher um Zhong Lin Wang vom Georgia Institute of Technology in Atlanta (Georgia) entwickeln derzeit Kleidung mit eingewebten Fasern, die elektrische Energie erzeugen, sobald sie sich verformen – etwa beim Laufen.

Die Fäden bestehen aus dem Kunststoff Kevlar und messen etwa einen Zentimeter. Damit sie paarweise einen Nanogenerator



MAXIMILIEN BRICE, CERN

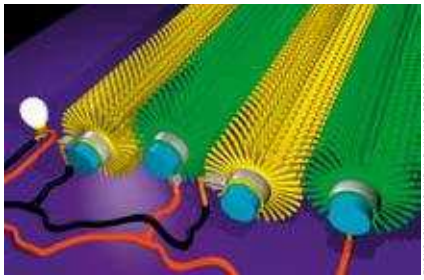
Im Mai fällt der Startschuss für das größte wissenschaftliche Experiment der Menschheitsgeschichte. Dann werden im Large Hadron Collider, dem leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger aller Zeiten, die ersten Protonen ineinanderkrachen. Sechs Detektoren sollen die Produkte der gewaltigen Kollisionen registrieren. Das Foto zeigt einen davon namens Atlas vor dem Einbau des Kalorimeters, das die Energien der Trümmerteilchen bestimmt. Wie riesige Spinnenbeine erscheinen die acht toroidalen Magnete, welche die Protonen auf ihrer Bahn halten. Das gigantische Experiment am Europäischen Kernforschungszentrum Cern bei Genf soll unter anderem klären, warum die gängigen Teilchen eine Masse haben, und woraus die Dunkle Materie im Universum besteht. Erste Ergebnisse sind Anfang des nächsten Jahres zu erwarten.

bilden, lassen die Wissenschaftler aus einem Polymer an ihrer Oberfläche feine, nur etwa 3,5 Mikrometer lange Nanodrähte aus Zinkoxid in einer speziellen Lösung gleichmäßig radial emporwachsen. Jeweils eine der beiden Fasern ist zusätzlich mit einer 300 Nanometer dicken Goldschicht überzogen und dient so als Schottky-Kontakt, der den Stromfluss garantiert.

Schon bei geringsten Bewegungen reiben die borstigen, parallel angeordneten Nanodrähte gegeneinander. Dadurch biegen sich die Halbleiter und wandeln wegen ihrer piezoelektrischen Eigenschaften mechanische in elektrische Energie um. Bei einer Ausgangsspannung von vier Millivolt erreichte ein solcher Nanogenerator eine Stromstärke von etwa vier Nanoampere.

Durch Zusammenschluss mehrerer Exemplare wollen die Forscher die Stromausbeute erhöhen. Theoretisch ließe sich pro Quadratmeter eine Leistung von bis zu 80 Milliwatt erzielen; die genügsamsten heutigen MP3-Spieler brauchen 200 Milliwatt. Einziger Nachteil: Das Zinkoxid ist wasserempfindlich. Nach dem Jogging kann man den Anzug also nicht einfach in die Waschmaschine stecken. *Nature, Bd. 451, S. 809*

Mitarbeit: L. Fischer, M. Jessl und Ch. Marty



ZHONG-LIN WANG UND X. D. WANG, GEORGIA TECH

Im Nanogenerator reiben die mit Gold beschichteten Fasern (gelb) gegen die nackten (grün). Beim Verbiegen der piezoelektrischen Nanodrähte, die von den Fäden abstehen, wird elektrischer Strom erzeugt.

MIKROBIOLOGIE

Riesiges Genreservoir eines Krankheitserregers

Das kleine Erbgut der Bakterien täuscht über ihre wahre genetische Variabilität. So verfügt eine eng verwandte Bakteriengruppe um den Milzbranderreger nach neuesten Erkenntnissen insgesamt über etwa so viele verschiedene Gene wie der Mensch.

Von Siegfried Scherer
und Monika Ehling-Schulz

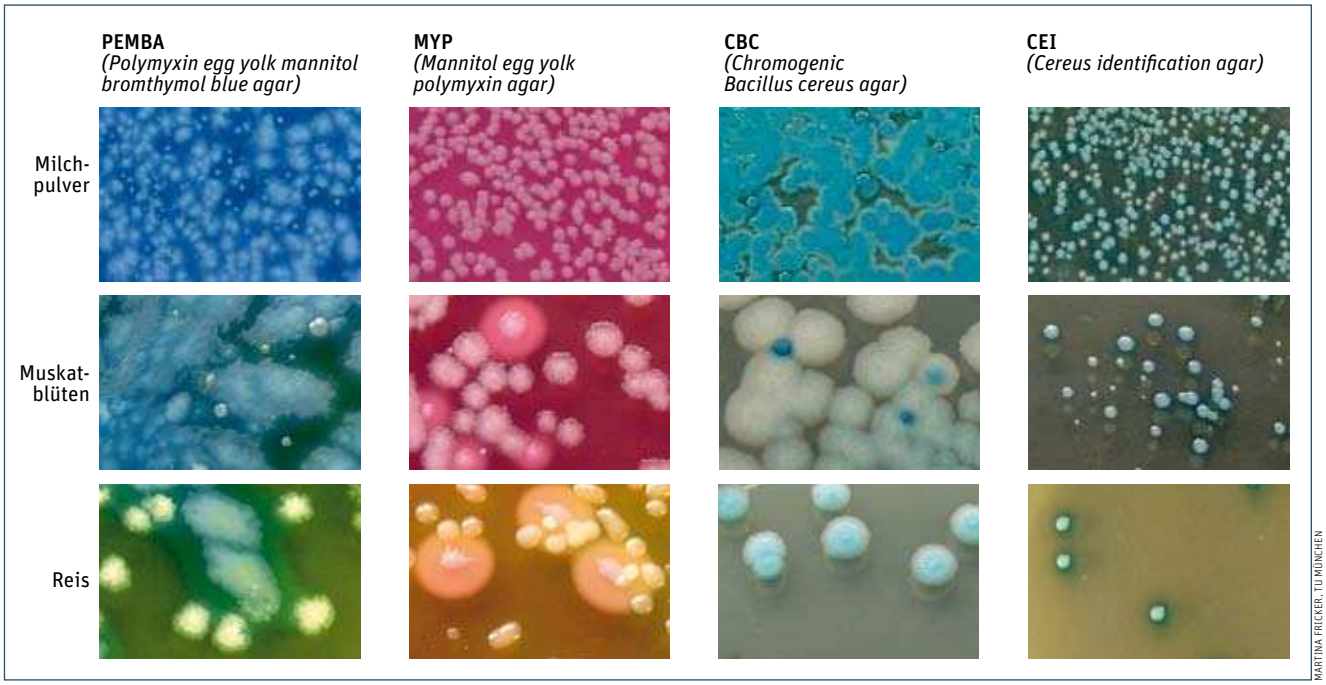
In Deutschland erkranken pro Jahr weit über eine Million Menschen an Infektionen durch Bakterien und Viren in Lebensmitteln. Einige der Erreger, beispielsweise Salmonellen, werden durch Tiere oder Tierprodukte übertragen und kommen in der Umwelt selten vor. Doch von anderen wimmelt es dort geradezu. So enthält ein Gramm Erde bis zu eine Million Exemplare von *Bacillus cereus*, das damit zu den häufigsten kultivierbaren Bodenbakterien zählt. In den letzten Jahren haben von ihm verursachte Erkrankungen, die mit Erbrechen und Durchfall einhergehen, stark zugenommen.

Der Keim bildet mit einigen anderen Arten die *Bacillus-cereus*-Gruppe. Deren Vertreter sind genetisch so nahe miteinander verwandt, dass sie eigentlich zu einer Art gehören. Aus historischen, rechtlichen und medizinischen Gründen werden sie aber immer noch als verschiedene Arten geführt.

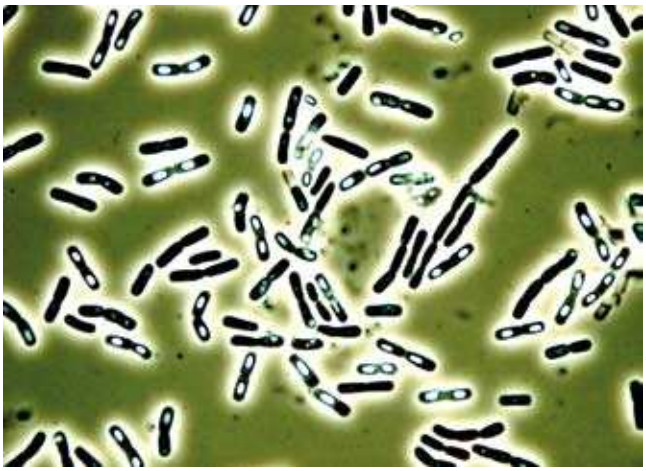
Als Unterscheidungsmerkmal dienen die Krankheiten, die sie auslösen. So bildet der Milzbranderreger *Bacillus anthracis* den für Menschen tödlichen Giftstoff Anthrax. Das Toxin von *B. thuringiensis* schädigt dagegen ausschließlich Insekten und kommt deshalb bei der Schädlingsbekämpfung zum Einsatz.

Wegen der Bedeutung von Anthrax als potenzielle Biowaffe wurde schon vor sechs Jahren das Erbgut des Milzbranderregers komplett entziffert. Inzwischen hat die DNA-Sequenzierung allerdings einen derart stürmischen Fortschritt erlebt, dass es heute technisch möglich ist, das Genom eines Bakteriums buchstäblich über Nacht zu sequenzieren. Viel schwieriger und zeitraubender ist dann die Interpretation der Daten.

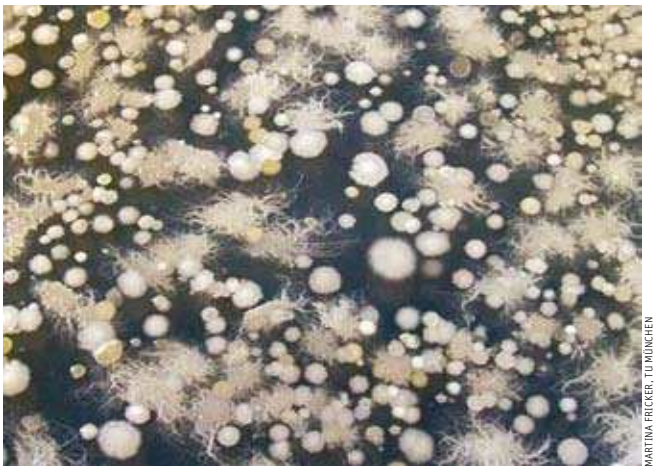
Alle Mitglieder einer Bakteriengruppe teilen sich einen bestimmten Satz von Genen. Ihn bezeichnet man als ihr Core-Genom. Es umfasst bei *B. cereus* und seinen engsten Verwandten etwa 3000 Gene. Das restliche, individuelle Erbgut heißt akzessorisches Genom. Auch darin



Varianten von *Bacillus cereus* aus Milchpulver, Muskatblüte und Reis wurden hier auf vier verschiedenen Indikator-Nährböden gezüchtet. Die Vielfalt an Kolonieformen und Farben ist ein Hinweis auf eine unterschiedliche Genausstattung.



HERBERT SEILER, TU MÜNCHEN



MARTINA FRICKER, TU MÜNCHEN

Bacillus cereus (links) ist ein grampositives, stäbchenförmiges Bakterium, das unter widrigen Umständen Sporen ausbildet. Dadurch kann es auch die Hitzebehandlung von Lebensmitteln überstehen. Die Sporen sind im Phasenkontrastmikroskop als helle, ovale Einschlüsse zu sehen. Vegetative Zellen erscheinen dunkel. Die Zellen sind etwa vier Mikrometer lang und einen Mikrometer breit. Von einer erstaunlichen Vielfalt zeugen die auf einem Kulturmedium gewachsenen Kolonien von Bakterien aus der _Bacillus-cereus_-Gruppe, die alle aus einer einzigen Bodenprobe stammen (rechts). Bei den Kolonien mit dünnen Ausläufern handelt es sich um _B. mycoides_.

gibt es freilich Gene, die bei einzelnen Untergruppen von Bakterien gemeinsam vorkommen. Diese Untergruppen bilden demnach eigene Evolutionslinien. Deren Zahl wirft ein Schlaglicht auf die genetische Vielfalt der Gruppe.

Wie viele solche Evolutionslinien existieren bei *B. cereus* und seinen engsten Verwandten? Erste Abschätzungen dazu beruhen auf einer neuen taxonomischen Methode namens MLST *(multi locus sequence typing)*. Dabei werden von möglichst vielen Mitgliedern einer Bakteriengruppe fünf bis zehn Gene sequenziert und miteinander verglichen. Daraus lässt sich ein Stammbaum rekonstruieren, der die Zahl der Evolutionslinien widerspiegelt.

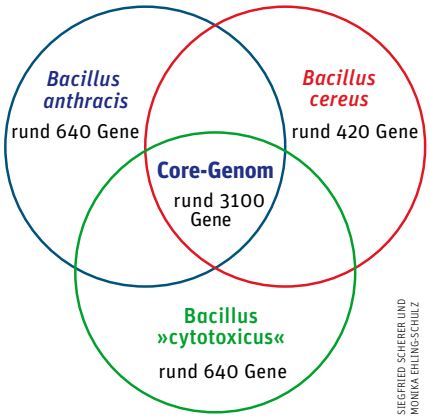
Kürzlich hat ein Team um Alexei Sorokin vom Laboratoire de Génétique Microbienne in Jouy-en-Josas (Frankreich) mit hundert zufällig ausgewählten Isolaten von *Bacillus cereus* aus einer Bodenprobe von einem Wald bei Versailles eine solche Analyse durchgeführt. Dabei ermittelten die Forscher allein in diesem kleinen Stückchen Erde 14 Evolutionslinien, von denen zudem fünf bisher unbekannt waren. Das illustriert die extrem hohe Mikrobiodiversität von *B. cereus*; unter den analysierten Isolaten befanden sich kaum Duplikate.

Leider gibt es nur wenige derart detaillierte Untersuchungen, doch sprechen die bisherigen Daten für mindestens dreißig bis vierzig Evolutionslinien; wahrscheinlich sind es noch viel mehr. Bei zehn davon wurde bisher ein Vertreter vollständig sequenziert. Der Vergleich der Daten zeigt, dass jede Evolutionslinie 400 bis 800 Gene aufweist, die nur bei ihr vorkommen. Für alle zehn Linien zusammen ergibt das eine Zahl von rund 6000. Die Summe sämtlicher Gene, die bei den Vertretern der *B.-cereus*-Gruppe bisher identifiziert sind, beläuft sich also, das Core-Genom eingeschlossen, auf 9000. Biologen sprechen in diesem Zusammenhang vom Pan-Genom. Wenn die noch nicht sequenzierten Evolutionslinien ähnlich unterschiedlich sind wie die bekannten, umfasst es in der *B.-cereus*-Gruppe 20 000 bis 25 000 Gene oder mehr – in etwa so viele wie das menschliche Erbgut.

Bakterien (Prokaryoten) sind im Vergleich zu kernhaltigen Zellen (Eukaryoten) sehr klein. Das erlaubt rasche Diffusion und damit sehr schnelles Wachstum. Auf der anderen Seite begrenzt es aber die Menge an DNA, die in einer Bakterienzelle Platz findet, was die Flexibilität in Sachen Stoffwechsel einschränkt. Vielleicht liegt die Lösung für dieses Problem im Pan-Genom. Es bietet einer Bakteriengruppe ein gewaltiges, bisher weit gehend unbekanntes Reservoir an Genen, auf die sie zurückgreifen kann. Dabei wird das Core-Genom in einer Art Baukastensystem flexibel ergänzt.

Man weiß schon lange, dass Bakterien per Konjugation (einer Art Kopulation) Erbmaterial austauschen können. Erst in den letzten Jahren ist jedoch deutlich geworden, in welchem Ausmaß weitere Mechanismen wie Gentransport durch Viren oder die Aufnahme freier DNA aus der Umwelt zur Veränderung bakterieller Genome beitragen. Diese Prozesse firmieren unter dem Stichwort horizontaler Gentransfer. Die dabei mehr oder weniger zufällig aufgenommenen Gene können in einer Umgebung mit einem entsprechenden Selektionsregime einen entscheidenden Vorteil bringen. Solche Evolutionsexperimente finden unablässig in jedem Gramm Boden statt.

Eine neue ökologische Nische für ein Bakterium kann aber auch ein neuer Wirt sein. Gerade bei Pathogenitätsfak-



SIEGFRIED SCHERER UND MONIKA EHLING-SCHULZ

Die Genome von drei Vertretern der _Bacillus-cereus_-Gruppe sind hier in einem so genannten Venn-Diagramm vergleichend dargestellt. Das Kerngenom umfasst die Gene, die in allen drei Organismen vorkommen. Angegeben ist außerdem, über wie viele Gene jedes Bakterium exklusiv verfügt.

toren von Krankheitserregern vermutet man, dass sie durch horizontalen Gentransfer ausgetauscht werden. Dasselbe gilt für Antibiotikaresistenzen. Die Vermutung liegt deshalb nahe, dass auch die Evolution hochpathogener Stämme von Krankheitserregern mit dem Gen-Reservoir im Pan-Genom zusammenhängt.

Bakterien sind allerdings nicht darauf beschränkt, sich bei nahe verwandten Individuen frisches Erbgut zu besorgen, auch wenn dies in den meisten Fällen geschieht. Sie haben prinzipiell Zugriff auf das Gesamtangebot an Genen in ihrer Umgebung. Und da kann uns Menschen schon angst und bange werden. Man schätzt, dass in einem einzigen Gramm Boden 10 000 Bakterienarten mit insgesamt bis zu zehn Milliarden Zellen leben. Daraus ergibt sich eine potenzielle genomische Flexibilität kaum überschaubaren Ausmaßes. Durch die Fähigkeit, genetische Informationen aus diesem gigantischen Genreservoir in vielerlei Variationen zusammenzustellen, befinden sich Bakterien gleichsam auf der Überholspur der Evolution. Das ist nicht gut für uns Menschen, wenn es sich dabei um Krankheitserreger handelt.

Siegfried Scherer leitet den Lehrstuhl für Mikrobielle Ökologie am Wissenschaftszentrum Weihenstephan der Technischen Universität München. **Monika Ehling-Schulz** habilitiert dort über Virulenzfaktoren und die Populationsstruktur der *Bacillus-cereus*-Gruppe.

EVOLUTION Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Rechts oder links bei Mausmakis

Wie Versuche mit Halbaffen ergaben, tickten schon bei unseren frühen Primatenvorfahren die Gehirne von Männern und Frauen unterschiedlich.

Von Marina Scheumann
und Elke Zimmermann

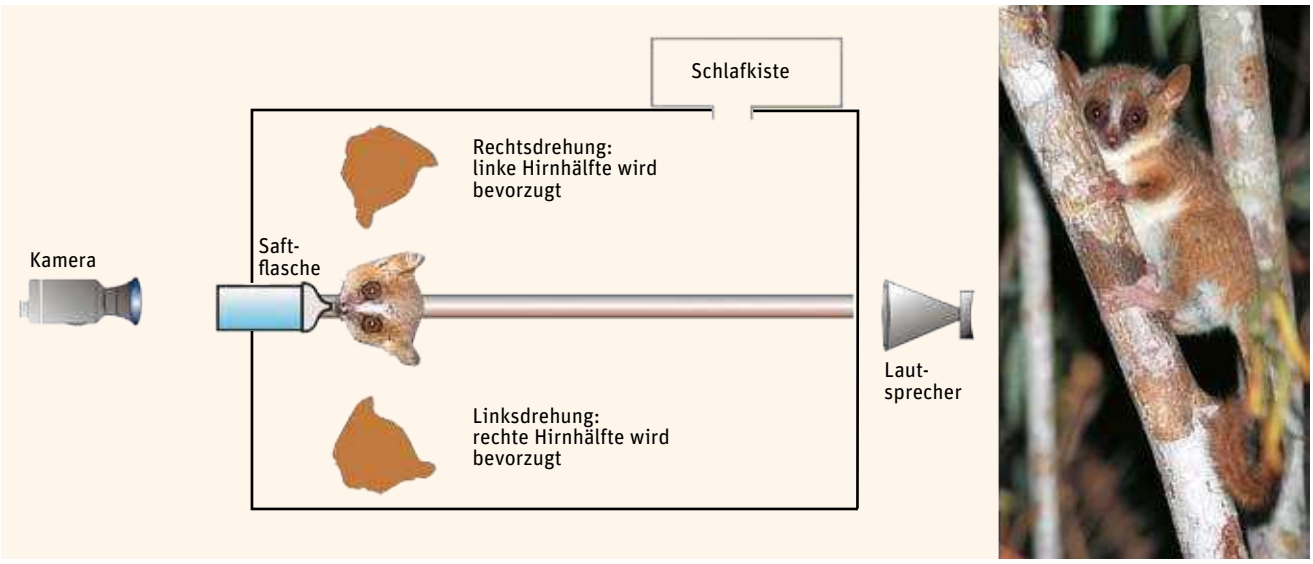
Höchstwahrscheinlich haben Sie die Seite gerade mit Ihrer rechten Hand umgeblättert, denn rund neunzig Prozent aller Menschen sind Rechtshänder. Dabei wurde Ihre Bewegung von Ihrer linken Großhirnhälfte gesteuert. Genauso wie wir zwei Arme, Beine, Augen und Ohren haben, ist nämlich auch unser Großhirn in zwei so genannte Hemisphären unterteilt. Dabei kontrolliert die linke Hälfte überwiegend die rechte Körperseite und umgekehrt.

Beide Hemisphären sind allerdings nicht völlig gleich, sondern haben sich auf verschiedene Aufgaben spezialisiert. Das spart neuronale Kapazität. So ist bei den meisten Rechtshändern die linke Hemisphäre zugleich für die Verarbeitung von Sprache zuständig. Solche Menschen bevorzugen deshalb nicht nur ihre rechte Hand – ihr rechtes Ohr hört auch bei Unterhaltungen etwas genauer hin. Tatsächlich scheinen Händigkeit und Sprachverarbeitung gekoppelt zu sein: Beide werden nicht nur von der gleichen Hemisphäre kontrolliert, sondern eine Handbewegung, ja schon ihre bloße Beobachtung aktiviert Gehirngebiete, die auch beim Sprechen aktiv sind.

Spezialisierungen der Hirnhälften galten lange als Besonderheit des Menschen. Inzwischen mehren sich jedoch die Hinweise auf ähnliche Asymmetrien bei Tieren. Aufmerksame Haustierhalter können etwa feststellen, dass ihr Liebling überwiegend eine bestimmte Pfote oder einen Fuß einsetzt. Eine solche Händigkeit ließ sich mit standardisierten Tests nicht nur bei Säugern, sondern auch bei Vögeln, Fröschen und sogar Krabben nachweisen.

Allerdings gibt es bei den meisten Tierarten keine durchgehende Vorliebe,

Während ein Mausmaki – rechts ein Foto aus Madagaskar – an einer Saftflasche leckt, werden ihm Laute von einem Lautsprecher in seinem Rücken vorgespielt. In welche Richtung er den Kopf dreht, gibt dabei einen Hinweis darauf, in welcher Hemisphäre das akustische Signal bevorzugt verarbeitet wird.

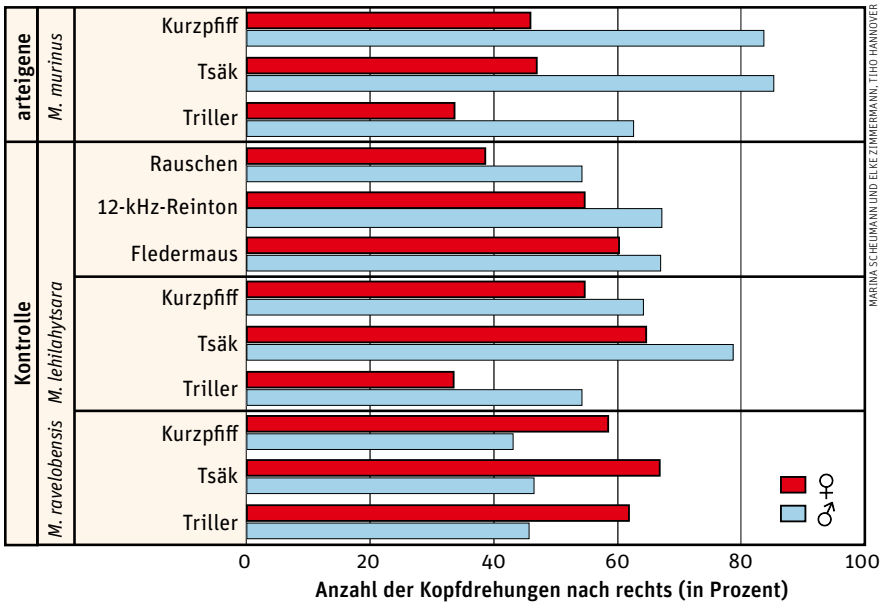


MARINA SCHEUMANN UND ELKE ZIMMERMANN, TIHO HANNOVER

die für alle oder zumindest die große Mehrheit der Individuen gilt. Ihre Mieze kann also genauso wahrscheinlich Rechts- wie Linkspföter sein. Eine arttypische Rechtshändigkeit wie der Mensch zeigten bisher nur Ratten und einige Affenarten.

Und wie steht es mit der Verarbeitung von Kommunikationslauten? Erfolgt sie bei Tieren auch bevorzugt in einer Hirnhälfte und, wenn ja, vielleicht sogar bei allen Vertretern einer Art immer in derselben? Erstaunlicherweise scheint die Antwort Ja zu heißen. So bevorzugen Vögel, Mäuse, Robben und Affen überwiegend die linke Hemisphäre für die Verarbeitung arteigener Kommunikationslaute.

Das ergaben neurologische und verhaltensbiologische Untersuchungen wie der Kopf-Dreh-Test, der aus der Säuglingsforschung stammt. Dabei werden genau in der Mitte hinter dem Versuchstier Laute abgespielt. Die Drehrichtung des Kopfes weist dann darauf hin, welche Hirnhälfte das jeweilige akustische Signal bevorzugt verarbeitet. Ist es zum Beispiel die linke, hört das Versuchstier mit dem rechten Ohr genauer hin und dreht den Kopf folglich nach rechts.



Den Mausmakis wurden zwölf Laute vorgespielt. Drei davon gehörten zu ihrem eigenen Kommunikationsrepertoire, die anderen neun waren entweder nicht biologisch oder stammten von anderen Tierarten. Die Männchen drehten bei zwei arteigenen, emotional negativen Lauten (Kurzpfiffen, Tsäks) den Kopf in mehr als achtzig Prozent der Fälle nach rechts. Ansonsten gab es weder bei ihnen noch bei den Weibchen eine statistisch signifikante Bevorzugung einer Seite.

Männchen hören einseitig

Im Fall der »Sprachverarbeitung« gibt es also eine Gehirnlateralisierung – wir möchten sie vereinfachend als Ohrigkeit bezeichnen –, die nicht nur bei Mitgliedern ein und derselben Spezies, sondern sogar bei den unterschiedlichsten Säugetierarten identisch ist. Dagegen wechselt die Händigkeit, wie erwähnt, im Allgemeinen zwischen den Individuen. Beide können demnach – anders als beim Menschen – nicht miteinander gekoppelt sein. Uns interessierte deshalb, wie früh in der Stammesgeschichte von *Homo* diese für uns typische Kopplung auftrat. Und so stellten wir uns folgende Fragen: Welche Spezialisierung zeigt das Gehirn phylogenetisch alter Primaten? Weisen diese bereits eine arttypische Händigkeit und eine Ohrigkeit für arteigene Kommunikationslaute auf? Und sind beide Eigenschaften auch bei ihnen schon gekoppelt?

Als Versuchstiere wählten wir Graue Mausmakis *(Microcebus murinus)*, die als Modell für ursprüngliche Primaten gelten. Sie gehören zu den Lemuren, einer Halbaffengruppe, die nur auf Madagaskar beheimatet ist. Ihre Vorfahren haben sich vor rund 50 Millionen Jahren entwickelt. Treten bestimmte Merkmale sowohl bei Lemuren als auch bei echten Affen auf, lässt das darauf schließen, dass sie auch beim gemeinsamen Vorfahren aller Primaten vorhanden waren.

Am Institut für Zoologie der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover prüften wir zunächst, ob Graue Mausmakis, ähnlich uns Menschen, Rechtshänder sind. Hierzu ließen wir die Tiere einen Mehlwurm, eine ihrer Leibspeisen, durch eine kleine Öffnung aus einer transparenten Box ziehen. Achtzig Prozent von ihnen griffen bevorzugt mit einer bestimmten Hand zu. Welche das war, ob die rechte oder die linke, wechselte allerdings von Tier zu Tier.

Als Nächstes untersuchten wir mit dem Kopf-Dreh-Test die Ohrigkeit. Hierzu spielten wir den Mausmakis zwölf Laute vor, von denen drei zu ihrem arteigenen vokalen Repertoire gehörten und negative oder positive emotionale Zustände widerspiegelten. Um sicherzustellen, dass das Tier zu Beginn des Versuchs den Kopf gerade nach vorn gerichtet hielt, ließen wir es an einer Flasche mit seinem Lieblingssaft lecken (Bild links).

Über beide Geschlechter gemittelt, schien zunächst kein Ohr statistisch signifikant bevorzugt zu werden. Doch es gibt ja noch den berühmten kleinen Unterschied. Und tatsächlich: Bei getrennter Analyse der Geschlechter sahen wir, dass sich die Männchen, nicht aber die Weibchen vorwiegend nach rechts drehten, wenn arteigene Laute eines negativen emotionalen Zustands vorgespielt wurden (Bild oben). Ein ähnlicher Unterschied findet sich bei uns Menschen. So nutzen Männer fast ausschließlich die linke Hemisphäre für die Sprachverarbeitung, während Frauen auch Teile der rechten Hirnhälfte einbeziehen.

Dazu passt, dass Frauen im Allgemeinen nicht nur viel redseliger sind als Männer, sondern auch ihre Hemisphären mehr miteinander kommunizieren. Entsprechend ist bei ihnen das *Corpus callosum*, die auch Balken genannte Verbindung zwischen beiden Großhirnhälften, stärker ausgeprägt. Interessanterweise gilt dasselbe für Mausmaki-Weibchen.

Beim Menschen lässt sich der Unterschied zwischen den Geschlechtern mit den Verhältnissen bei unseren Urahnen plausibel machen. Frauen waren vermutlich primär für den Nachwuchs und den Zusammenhalt der Gruppe verantwortlich. Sie mussten demnach gut kommunizieren können, um das soziale Gefüge in der Familie aufrechtzuerhalten und die Erziehung der Kinder zu managen. Die Domäne der Männer war dagegen die Jagd. Allzu viel Gerede hätte dabei

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile!

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.

2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.

3. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.

4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.

5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.

6. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können, sowie den Spektrum-Mitgliederausweis mit zahlreichen Vergünstigungen.

Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon:	06221 9126-743
per Fax:	06221 9126-751
per E-Mail:	service@spektrum.com

oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

Abonnieren oder verschenken

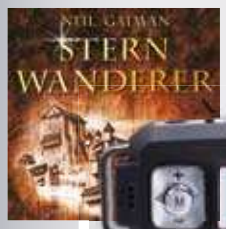
Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.

Buch »Die 7 größten Rätsel der Wissenschaft«
Erfrischend einfach und lebendig erklären David und Arnold Brody die sieben Pfeiler der Naturwissenschaften.

Leser werben Leser

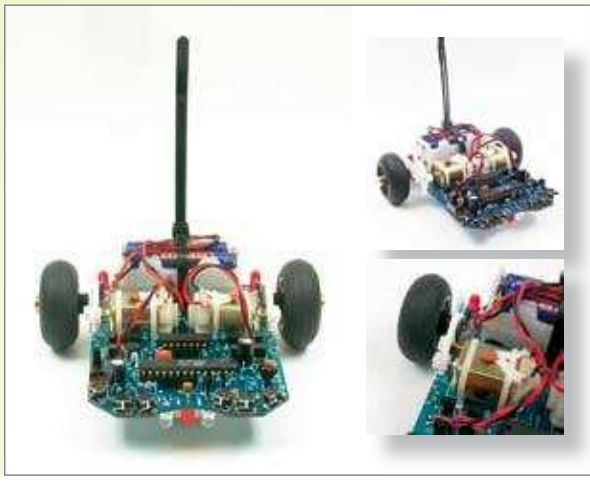
Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Trekstor 1-GB-MP3-Player
Der MP3-Player speichert Ihre Lieblingslieder auf kleinstem Raum.



Diese Sonderedition beinhaltet weiterhin das Hörbuch zur Filmvorlage »Sternwanderer« von Neil Gaiman.

Produkt des Monats



Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Mannheim | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

wohl die Beute vertrieben. Wichtig waren stattdessen eine knappe, präzise Verständigung und ein gutes räumliches Vorstellungsvermögen. Diese Arbeitsteilung spiegelt sich bis heute in unserem Gehirn wider. Bei Männern sind die Zuständigkeiten klar getrennt: rechts das räumliche Vorstellungsvermögen, links die Sprachverarbeitung. Frauen dagegen nutzen die rechte Hemisphäre zusätzlich für Sprache – und müssen so eben öfter mal nach dem Weg fragen.

Auch bei den Grauen Mausmakis unterscheidet sich der Lebensstil von Männchen und Weibchen. Nachts gehen beide einzeln auf Nahrungssuche. Doch den Tag verbringen die Weibchen mit Geschlechtsgenossinnen in Wohngemeinschaften, wo sie auch ihre Jungen gemeinsam aufziehen. Männchen hingegen bevorzugen ein Singledasein.

Das passt zu unserem Befund, wonach Kommunikationsunterschiede der Geschlechter schon bei den ursprünglichen Primaten auftreten. Allerdings waren Händigkeit und Verarbeitung akustischer Signale offenbar noch nicht gekoppelt. Zwar bevorzugen männliche Mausmakis ihr rechtes Ohr für die Wahrnehmung arteigener Laute, sind aber deshalb nicht überwiegend Rechtshänder. Und bei den Weibchen geht ohnehin alles querbeet.

Demzufolge scheinen sich die arttypische Rechtshändigkeit und ihre Kopplung mit dem Verarbeiten von Kommunikationslauten erst in der späteren Evolution der Primaten herausgebildet zu haben. Eine Gemeinsamkeit bestand dagegen von Beginn an: Die Gehirne von Frauen und Männern ticken nicht nur bei uns Menschen unterschiedlich, sondern taten es auch schon bei unseren frühen Primatenvorfahren.

Marina Scheumann hat in Leipzig Biologie studiert und am Zentrum für systemische Neurowissenschaften sowie am Institut für Zoologie der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover über die akustische Kommunikation bei Primaten promoviert. **Elke Zimmermann** ist Direktorin dieses Instituts und lehrt dort Zoologie.

MATERIALFORSCHUNG 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Gecko im Operationssaal

US-Forscher haben ein Klebeband nach Gecko-Vorbild entwickelt. Dank einer Beschichtung, die für biologische Verträglichkeit und gute Haftwirkung auch an feuchten Oberflächen sorgt, könnte es Chirurgen die Arbeit erleichtern.

Von Michael Groß

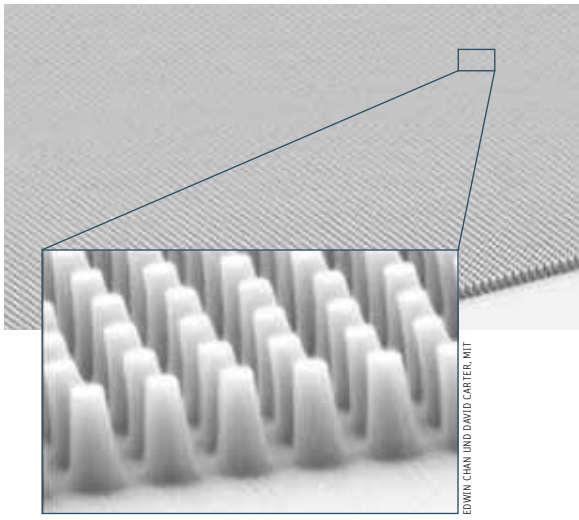
Geckos – jene in tropischen Ländern häufigen Eidechsen, die mühelos die Wand hochlaufen können – avancierten im Jahr 2000 zum Lieblingstier der Materialforscher. Damals hatten US-Wissenschaftler herausgefunden, dass die phänomenale reversible Haftung ihrer Füße auf Van-der-Waals-Kräften zwischen Millionen von Nanofasern (so genannten Setae) und dem Untergrund beruht (Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 16). Doch zu der Zeit waren die Fertigungsmethoden der Nanotechnologie noch nicht gut genug, um geckogleich haftende Materialien künstlich zu erzeugen.

Inzwischen ist dieses Ziel in den Bereich des Machbaren gerückt. Jüngst präsentierte die Arbeitsgruppe von Ron Fearing in Berkeley (Kalifornien), der auch an der Aufklärung des Haftprinzips im Jahr 2000 beteiligt war, das erste Klebeband, das fünf von sieben Kriterien für geckotypische Hafteigenschaften aufweist *(Journal of the Royal Society: Interface 2008, doi: 10.1098/rsif.2007.1308)*:

- richtungsabhängige Haftwirkung nach kurzer Gleitbewegung,
- große Tragkraft im Vergleich zur Andrückkraft,
- geringer Kraftaufwand zum Ablösen der Bindung,
- kein Verfilzen der Fasern auch nach häufiger Benutzung,
- keine Klebrigkeit außer der Van-der-Waals-Haftung.

Nur an der Selbstreinigung und der völligen Unabhängigkeit von der Oberflächentextur müssen die Forscher noch arbeiten. Beeindruckend ist vor allem – wie beim natürlichen Vorbild – die schiere Tragkraft solcher Materialien. Ein daumengroßes Stück von Fearings Klebeband, an ein Fenster gepappt, trägt leicht 400 Gramm.

Doch wozu soll das nützlich sein, außer vielleicht für Extrembergsteiger, die aber auch heute schon an senkrechten Wänden emporklettern – ganz ohne Klebeband? Bei der anwendungsbezogenen Gecko-Forschung ist Wissenschaftlern in Boston nun der jüngste Coup gelungen. Die Arbeitsgruppen von Robert Langer am Massachusetts Institute of Technology und Jeffrey Karp an der Harvard-Universität, beide in Cambridge (Massachusetts), haben einen biologisch verträglichen und abbaubaren Klebefilm auf der Grundlage des Gecko-Prinzips entwickelt – mit Blick auf einen möglichen Einsatz in der Chirurgie *(Proceedings of the National Academy of Sciences, Bd. 105, S. 2307)*.



EDWIN CHAN UND DAVID CARTER, MIT

Mit unzähligen gleichmäßig angeordneten Minisäulen bestückt ist eine Kunststofffolie, die US-amerikanische Forscher mit Gussformen aus Silizium hergestellt haben. Sie haftet an Oberflächen ebenso fest wie Geckofüße – dank einer speziellen Beschichtung auch in feuchter Umgebung.

Die US-Forscher stellten mit den lithografischen Methoden der Halbleitertechnologie Gussformen aus Silizium her, in denen sie den neuartigen elastischen Kunststoff PGSA (Poly-Glycerin-Sebacat-Acrylat) zu Bataillonen von leicht konischen Säulen formten (Bild). Um die optimale Beschaffenheit der Klebefasern zu finden, variierten sie deren Höhe (0,8 bis 3,0 Mikrometer) sowie ihren Durchmesser an der Spitze (0,1 bis

1,0 Mikrometer) und ihren Abstand (0,8 bis 2,7 Mikrometer). Dann testeten sie die Adhäsion des Materials an Schweinedärmen. Die besten Ergebnisse erhielten die Forscher, wenn die Fasern im Rahmen des untersuchten Spektrums möglichst lang, an der Spitze dünn und weit entfernt voneinander waren.

Für den Gecko, der an nackten Felswänden oder gar Fensterscheiben emporläuft, genügt es, dass seine Setae die richtigen Abmessungen haben – auf ihre Oberflächenchemie kommt es nicht an. Bei medizinischen Klebefilmen, die im wässrigen Milieu des Körpers funktionieren müssen, ist die Beschaffenheit der Oberfläche hingegen nicht ganz vernachlässigbar. Reine Gecko-Materialien haften auf einem feuchten Untergrund wesentlich schlechter als in einer trockenen Umgebung.

Deshalb verließen sich Karp und Langer nicht allein auf die Van-der-Waals-Kräfte ihrer sorgsam entwickelten Kunststoffhaare, sondern beschichteten die Nanofasern zusätzlich mit einem Kohlenhydrat, nämlich teilweise oxidiertem Dextran (Dextran-Aldehyd, DXTA). Diese Substanz hatte sich schon in anderen Zusammenhängen als günstiger Überzug von Implantaten erwiesen. Sie sorgt für biologische Verträglichkeit und hilft, Entzündungsreaktionen zu vermeiden. Im Sinn der reinen Gecko-Lehre handelt es sich hier natürlich um Mogelei, denn der Dextran-Aldehyd kann mit Zelloberflächen-Proteinen chemische Bindungen eingehen.

Das beschichtete Klebeband testeten die Forscher dann in lebenden Ratten und erhielten befriedigende Ergebnisse hinsichtlich Haftkraft, Verträglichkeit und langfristiger Abbaubarkeit. Sie zeigen sich deshalb optimistisch, dass ihr neu entwickelter Werkstoff als Reparaturband, zum Beispiel bei Leistenbruchoperationen, sowie als Ersatz für chirurgische Nähte dienen kann.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

HALBLEITER 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Schaltelement für die Spintronik

Forscher haben einen Weg gefunden, den Spin eines einzelnen Elektrons in einem Halbleiter mittels eines elektrischen Felds umzuklappen. Damit ist eine Grundvoraussetzung für elektronische Quantencomputer erfüllt.

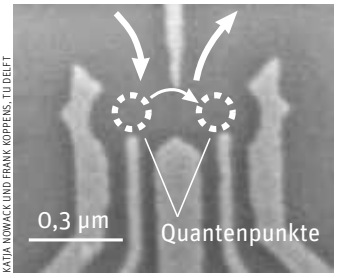
Von Stefan Maier

Allen Generationen von Computern und Spielkonsolen war bisher eines gemeinsam: Ihre Funktionsweise beruhte auf nur einer Eigenschaft des Elektrons – seiner Ladung. Der Spin – ein Eigendrehimpuls, der mit einem magnetischen Moment verbunden ist – blieb dagegen ungenutzt, obwohl er für die Physik mindestens ebenso wichtig ist. Wissenschaftler wie Lieven Vandersypen von der Technischen Universität Delft (Niederlande) wollen das nun ändern. Als Vertreter eines neuen Forschungsfelds namens Spintronik haben sie sich vorgenommen, die Orientierung des magnetischen Moments einzelner Elektronen für die Speicherung und Verarbeitung von Bits und Bytes heranzuziehen. Fernziel ist dabei ein futuristischer Computer, der quantenmechanischen Prinzipien gehorcht und es so fertigbringt, Unmengen von Operationen gleichzeitig auszuführen.

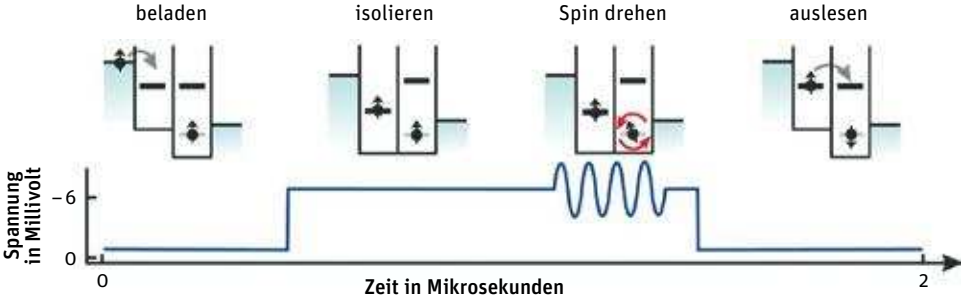
Wie lässt sich der Elektronenspin zur Datenverarbeitung heranziehen? Ganz einfach: In einem statischen Magnetfeld kann er sich parallel oder antiparallel zu den Feldlinien ausrichten. Ordnet man einem der beiden Zustände eine Eins und dem anderen eine Null zu, lässt sich auf diese Weise ein Bit speichern.

Doch das ist noch nicht alles. Bei der gespeicherten Information handelt es sich in diesem Fall nämlich nicht um eine einfache Binärziffer, sondern um ein so genanntes QBit. Dieses kann dank der Gesetze der Quantenmechanik in beliebigen Überlagerungen seiner beiden Grundzustände existieren, sagen wir zu sechzig Prozent im einen (antiparallel zum äußeren Magnetfeld) und zu vierzig Prozent im anderen (parallel). In derartigen Überlagerungen steckt einer der

Für ihren Versuch erzeugten die Forscher mit einem Schaltkreis auf einem Galliumarsenid-Chip zwei Quantenpunkte. Auf diese verteilten sie zwei Elektronen mit parallelem Spin, die dann durch Erhöhen der Spannung isoliert wurden. Ein angelegtes elektrisches Wechselfeld klappte anschließend den Spin des Teilchens im rechten Quantenpunkt um. Ob das Umklappen erfolgreich war, ließ sich beim Erniedrigen der Spannung feststellen. Nur in diesem Fall konnte das Elektron im linken Quantenpunkt auf den rechten übergehen, sodass ein Strom floss.



KATJA NOWACK UND FRANK KOPPENS, TU DELFT



Gründe, wieso Quantencomputer ihren heutigen Gegenstücken bei vielen Berechnungen weit überlegen sind – zumindest auf dem Papier.

Zum Umklappen des Elektronenspins, was dem Übergang zwischen eins und null entspricht, kann ein oszillierendes Magnetfeld dienen. Dessen Frequenz muss dabei nur auf die Energiedifferenz zwischen den beiden Spinzuständen abgestimmt sein und liegt gewöhnlich im Mikrowellenbereich.

Allerdings ist es extrem schwierig, auf engem Raum in einem Halbleiter ein magnetisches Wechselfeld zu erzeugen. Deshalb überlegte sich die Forschergruppe von Vandersypen, stattdessen ein oszillierendes elektrisches Feld zum Umklappen zu benutzen. Dafür genügen Metallelektroden mit angelegter Wechselspannung, wie sie schon seit Jahrzehnten in Transistoren eingebaut sind *(Science, Bd. 318, S. 1430)*.

An sich kann ein oszillierendes elektrisches Feld den Elektronenspin allerdings nicht beeinflussen. Zwar erzeugt es nach den Gesetzen der Elektrodynamik automatisch auch ein oszillierendes Magnetfeld. Dieses ist aber um mehr als zwei Größenordnungen zu schwach, um den Spin zu drehen. Doch existiert ein weiterer Effekt, über den ein oszillierendes elektrisches Feld das magnetische Moment eines Elektrons beeinflussen kann: die so genannte Spin-Bahn-Kopplung, das heißt die Wechselwirkung zwischen dem Bahn- und dem Eigendrehimpuls des Teilchens. Vandersypen und seine Kollegen vertrauten darauf, dass sie für das Umklappen ausreicht.

Jonglieren mit Quantenpunkten

Zur Realisierung ihrer Idee verwendeten die Forscher einen geschichteten Halbleiter, in dem sich unter der Oberfläche Elektronen in einer Ebene frei bewegen konnten. An ihm brachten sie zwei Elektroden in einer Weise an, dass bei angelegter elektrischer Gleichspannung zwei so genannte Quantenpunkte entstanden: Regionen mit einer Potenzialmulde, in die nur ein bis zwei Elektronen passten. Die dort gefangenen Teilchen dienten dann quasi als Versuchskaninchen.

Als Erstes legten die Forscher ein statisches Magnetfeld an. Dann füllten sie die beiden Quantenpunkte mit jeweils einem Elektron, dessen Spin entgegengesetzt zum äußeren Magnetfeld orientiert war. Schließlich wurde die Gleichspannung leicht angehoben. Das erhöhte die Potenzialbarriere um die Quantenpunkte, sodass die beiden gefangenen Elektronen keine Chance zum Entwischen mehr hatten.

Nun konnte der eigentliche Versuch beginnen. Dazu setzten Vandersypen und seine Mitarbeiter den rechten Quantenpunkt kurz einem elektrischen Wechselfeld aus, um den Spin seines Elektrons zu drehen. Das war nicht weiter schwer. Wesentlich schwieriger gestaltete sich anschließend der Nachweis, dass das magnetische Moment tatsächlich gekippt war.

Doch hatten sich die Forscher schon eine Lösung ausgedacht. Dafür war nämlich der zweite Quantenpunkt vorgesehen. Wenn die Wissenschaftler nach dem Anlegen des elektrischen Wechselfelds die Gleichspannung wieder senkten, wurde die Absperrung um das Gefängnis

ANZEIGE

Konzentrierter.
Belastbarer.
Ausgeglichener.

Aktivieren Sie Ihre Kraftwerke der Konzentration.
Konzentration ist Ihre Eintrittskarte zu geistiger Fitness – und die können Sie stärken und zur Höchstform bringen. Ihr Gehirn hat das Potenzial, ein Leben lang konzentriert und geistig aktiv zu sein. Die Energie dazu liefern Ihnen Ihre 100 Milliarden Gehirnzellen. Aktivieren Sie Ihre Gehirnzellen – jetzt NEU auch mit **Tebonin® konzent 240 mg.**

Tebonin®
Mehr Energie für das Gehirn.
Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.**
Stand: Januar 2008 T/01/08/1

Stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.

Ginkgo-Spezialextrakt EGb 761®
- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich

NEU

Mit der Natur.
Für die Menschen.
Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel
www.tebonin.de

durchlässig. Folglich konnte das Elektron im linken Quantenpunkt, dem Spannungsgefälle folgend, im Prinzip auf den rechten übergehen. Das war aber nur möglich, wenn das Teilchen dort seinen Spin umgeklappt hatte. Ein Quantenpunkt kann nämlich kein zweites Elektron aufnehmen, das dieselbe Spinorientierung aufweist wie das erste.

Die erfolgreiche Drehung des Elektronenspins machte sich also einfach durch einen Ausschlag des Strommessers bemerkbar: Das linke Elektron sprang auf den rechten Quantenpunkt, von wo es – oder sein Partner – weiter in Richtung positiver Elektrode wanderte; gleichzeitig rückte ein neues Elektron in den linken Quantenpunkt nach. Aus der Zeitverzögerung zwischen dem Anlegen des elektrischen Wechselfelds und dem Stromausschlag ließ sich auch ermitteln, wie lange das Umklappen des Spins dauerte: etwa hundert Nanosekunden.

Schwachpunkt Schaltzeit

Der Erfolg von Vandersypens Gruppe markiert einen Meilenstein auf dem langen Weg zum Quantencomputer. Denn damit existiert nun ein weiteres Schaltelement zur Durchführung von Logikoperationen. Bisher war schon ein Swap-Gatter, das den Austausch zweier Spins bewirkt, realisiert worden – und zwar sowohl bei Quantenpunkten auf Halbleitern als auch in ultrakalten Gasen (Spektrum der Wissenschaft 2/2008, S. 20).

Einen Wermutstropfen gibt es allerdings: Mit einer Schaltzeit von hundert Nanosekunden ist die Spinumkehr im Experiment der niederländischen Forscher ziemlich langsam. Da grundlegende Rechenoperationen mindestens genauso lange dauern würden, läge die Taktfrequenz eines entsprechenden Prozessors bei höchstens zehn Megahertz (gegenüber zwei bis drei Gigahertz bei heutigen PCs). Dabei ist jedoch zu bedenken, dass Quantencomputer ja viele Operationen gleichzeitig ausführen können. Deshalb sollten sie auch bei niedrigeren Taktfrequenzen herkömmlichen Rechnern überlegen sein.

Und wann wird nun voraussichtlich das erste Exemplar das Licht der Welt erblicken? Darüber schweigen sich auch die Spintroniker aus. Als Spektrum-Leser können Sie aber darauf vertrauen, dass Sie es rechtzeitig erfahren.

Stefan Maier ist Professor für Physik am Imperial College in London.

Springers Einwürfe

Seitensprung bei Mensch und Maus

Tiere sind zweifelhafte Vorbilder in Sachen eheliche Treue.

Anlässlich der kürzlich vom deutschen Gesetzgeber verfügten Erleichterung von Vaterschaftstests hörte ich: Geschätzte vier bis zehn Prozent aller Nachkommen stammen nicht vom vermeintlichen Vater, sondern sind Früchte eines Seitensprungs der Frau. Sie wurden dem Mann als so genannte Kuckuckskinder ins eheliche Nest gelegt.

Schon die alten Römer wussten: Pater semper incertus, der Vater ist immer ungewiss. So gesehen ist es wiederum recht beachtlich, wenn 90 bis 96 Prozent aller Menschenkinder darauf vertrauen dürfen, dass der pater familias tatsächlich ihr Erzeuger ist. Denn wie ein Blick hinüber zu den tierischen Verwandten zeigt, läuft eheliche Treue unserer biologischen Grundausstattung eher zuwider.

Monogamie ist in der Tierwelt die Ausnahme, und darum sind die Zoologen eifrig bemüht, ihre Gründe zu verstehen. Ein besonders beliebtes Forschungsobjekt ist die amerikanische Präriewühlmaus *(Microtus ochrogaster)*. Die flinken Nager, bei den Farmern des Mittleren Westens als Getreideschädlinge weniger geschätzt, gehen eine lebenslange Partnerschaft ein, und die Eltern ziehen ihre Jungen stets gemeinsam auf. Das ist umso erstaunlicher, als ein naher Verwandter, die Wiesenwühlmaus *(Microtus pennsylvanicus)*, von Partnertreue gar nichts hält, sondern die im Tierreich übliche Libertinage praktiziert. Während das Wiesenmausmännchen als ein rechter Don Juan durch die Halme streift, bauen Präriemäuse einträchtig ihr Nest und entfalten ein reges Geschlechtsleben zu zweit, das weit über die Erfordernisse bloßer Fortpflanzung hinausgeht.

So wurde die Präriemaus zum Tiermodell erfüllter ehelicher Liebe und Treue, und als man in ihr erhöhte Niveaus der Hormone Vasopressin und Oxytocin feststellte, kam die Hypothese auf, auch beim Menschen stärkten diese Substanzen den partnerschaftlichen Zusammenhalt. In den USA zogen konservative Sexualmoralisten daraus sogar den Schluss, Sex vor der Ehe dämpfe die Ausschüttung solcher Hormone und führe zu lebenslanger Promiskuität. Damit wurde aus einer moralischen Prämisse – kein Sex vor der Ehe! – über ein vermeintlich hochwissenschaftliches Bindeglied – die treue Präriemaus produziert mehr Hormone einer bestimmten Sorte – der gewünschte Schluss gezogen: Nur Sex in der Ehe garantiert, dass der Sex in der Ehe bleibt.

Doch nun hat der Zoologe Alexander Ophir von der Universität von Florida in Gainesville dem moralisch vorbildlichen Image der monogamen Maus einen schweren Schlag versetzt. Indem er die Streifzüge der Präriemäuse mit angehefteten Radiosendern verfolgte und an Nachkommen Vaterschaftstests durchführte, wies er nach, dass es mit der sexuellen Treue der hurtigen Tierchen nicht weit her ist: Sie gehen häufig fremd *(Nature, Bd. 451, S. 617)*.

Der Befund zwingt, zwischen sexueller Monogamie – die Partner verkehren ausschließlich miteinander – und sozialer Monogamie zu unterscheiden, bei der ein Paar dauerhaft zusammenbleibt und Junge aufzieht; ob diese freilich alle denselben Vater haben, ist längst nicht ausgemacht.

Bei Mann und Maus enthüllt der Vaterschaftstest den Unterschied zwischen sozialer Partnerschaft und sexueller Treue. Somit taugt die sozial monogame und sexuell zügellose Maus zwar als Tiermodell, aber gewiss nicht als Vorbild für menschliches Verhalten. Überhaupt kann aus dem Studium der Tierwelt zwar viel Wissenswertes über biologische Faktoren gewonnen werden, die uns prägen – aber niemals auch nur ein einziges Argument für moralisches Handeln.

Michael Springer

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Die Parallelwelten des HUGH EVERETT

Als er seine Theorie der multiplen Universen veröffentlichte, wurde sie von der physikalischen Gemeinde schlichtweg ignoriert. Zu Unrecht, wie sich später herausstellte. Doch Hugh Everett hatte der akademischen Welt schon den Rücken gekehrt und war ans Pentagon gewechselt.

Von Peter Byrne

In Kürze

- **Vor 50 Jahren** ersann Hugh Everett die Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik. Dieser zufolge führen Quanteneffekte zu zahllosen Verzweigungen des Universums, zu parallelen Universen, in denen jeweils Unterschiedliches geschieht.
- Seine Theorie ist **kein Fantasieprodukt**, denn Everett leitete sie aus fundamentalen Gleichungen der Quantenmechanik mathematisch ab. Dennoch wurde sie von den meisten Physikern seiner Zeit abgelehnt.
- Nachdem sich Everett **enttäuscht von der Physik abgewandt** hatte, arbeitete er sehr erfolgreich im Bereich militärischer und industrieller Anwendungen der Mathematik. Emotional war er jedoch sehr zurückgezogen, zudem galt er als starker Trinker.
- Everett starb mit nur 51 Jahren. Die **Anerkennung, die seine Arbeit mittlerweile findet**, erlebte er nicht mehr.

Hugh Everett war ein brillanter Mathematiker, ein begnadeter Quantentheoretiker und Weltbildzertrümmerer. Schon in jungen Jahren bereicherte er die Physik um eine neue Auffassung der Wirklichkeit. Später in seinem Leben wurde er allerdings Chef einer erfolgreichen Firma im Militärsektor. Dies verschaffte ihm – in Zeiten, in denen der nukleare Overkill drohte – Zugang zu den bestgehüteten Militärgeheimnissen der USA und verhalf ihm sogar zu Einfluss auf den Lauf der Weltgeschichte. In der Welt der Sciencefiction schließlich ist er ein Held, nämlich der Mann, der die Quantentheorie der multiplen Universen ersann.

Für seine Kinder war er wieder jemand anderes: ein emotional abwesender, unerreichbarer Vater, »ein Möbelstück, das am Esszimmertisch saß« und eine Zigarrette in der Hand hielt. Der Kettenraucher und Gewohnheitstrinker starb mit nur 51 Jahren. Dies jedenfalls war sein Leben in *unserem* Teil des Universums. Ist die Viele-Welten-Theorie korrekt, die Everett Mitte der 1950er Jahre als Student an der Universität Princeton formulierte, nahm es aber auch viele weitere Wege – nämlich jeweils andere in einer Unzahl von Paralleluniversen.

Seine bahnbrechenden Arbeiten überwanden einen theoretischen Engpass in der Quantenmechanik: die Erklärung des *Wie*. Obwohl die Viele-Welten-Theorie auch heute keineswegs allgemein akzeptiert ist, nahmen seine Problemlösungsstrategien das Konzept der Quantendekohärenz und damit die moderne Erklärung dafür vorweg, warum sich die probabilistischen Absonderlichkeiten der Quantenmechanik in unserer konkreten Erfahrungswelt auflösen.

Seine wissenschaftlichen Thesen sind in Physikerkreisen und philosophischen Zirkeln wohl bekannt. Nur wenige hingegen wissen um die Geschichte dieser Entdeckungen oder kennen Everetts Leben jenseits der Wissenschaft. Archivrecherchen unter anderem des russischen Historikers Eugene Shikhovtsev, meine eigene Suche nach Dokumenten sowie Gespräche, die ich mit einstigen Kollegen, Freunden und auch dem Sohn des Wissenschaftlers führte, bringen nun das Leben eines hochintelligenten Menschen ans Licht, der allzu früh seinen persönlichen Dämonen erlag.

Everetts Reise zu neuen Welten begann in einer Nacht des Jahres 1954 »nach einem oder zwei Glas Sherry«, wie er sich zwei Jahrzehnte später erinnerte. Er, sein Princeton-Kommilitone Charles Misner sowie Aage Petersen (dieser war damals Mitarbeiter von Niels Bohr und gerade zu Gast an der Universität) diskutierten über die »lächerlichen Folgerungen«, die sich aus der Quantenmechanik ergeben. In diesen Stunden kam Everett der Grundgedanke zu seiner Viele-Welten-Theorie, den er in den folgenden Wochen zu einem Dissertationsthema auszuweiten begann.

Im Grunde wollte er die mathematische Theorie *selbst* nutzen, um die Bedeutung der quantenmechanischen Gleichungen zu entschlüsseln – anstatt diesen lediglich interpretierende Hypothesen anzuhängen. Damit forderte der junge Mann das physikalische Establishment seiner Zeit heraus: Es galt, die fundamentale Frage zu überdenken, was physikalische Realität überhaupt ausmacht.

Wagemutig nahm sich Everett das berüchtigte quantenmechanische Messproblem vor, das die Physiker seit den 1920er Jahren beschäftigte. Es resultiert aus dem Widerspruch zwischen der Art und Weise, wie Elementarteilchen auf der mikroskopischen Quantenebene miteinander wechselwirken, und dem, was geschieht, wenn man sie in der klassischen

makroskopischen Ebene ausmisst. In der Quantenwelt kann sich ein Elektron oder ein Photon (oder mehrere solcher Teilchen) in einer Superposition, einer Überlagerung mehrerer möglicher Zustände, befinden. Ein Elektron in einer Superposition kann beispielsweise mehrere Aufenthaltsorte, Geschwindigkeiten und Spinorientierungen gleichzeitig besitzen.

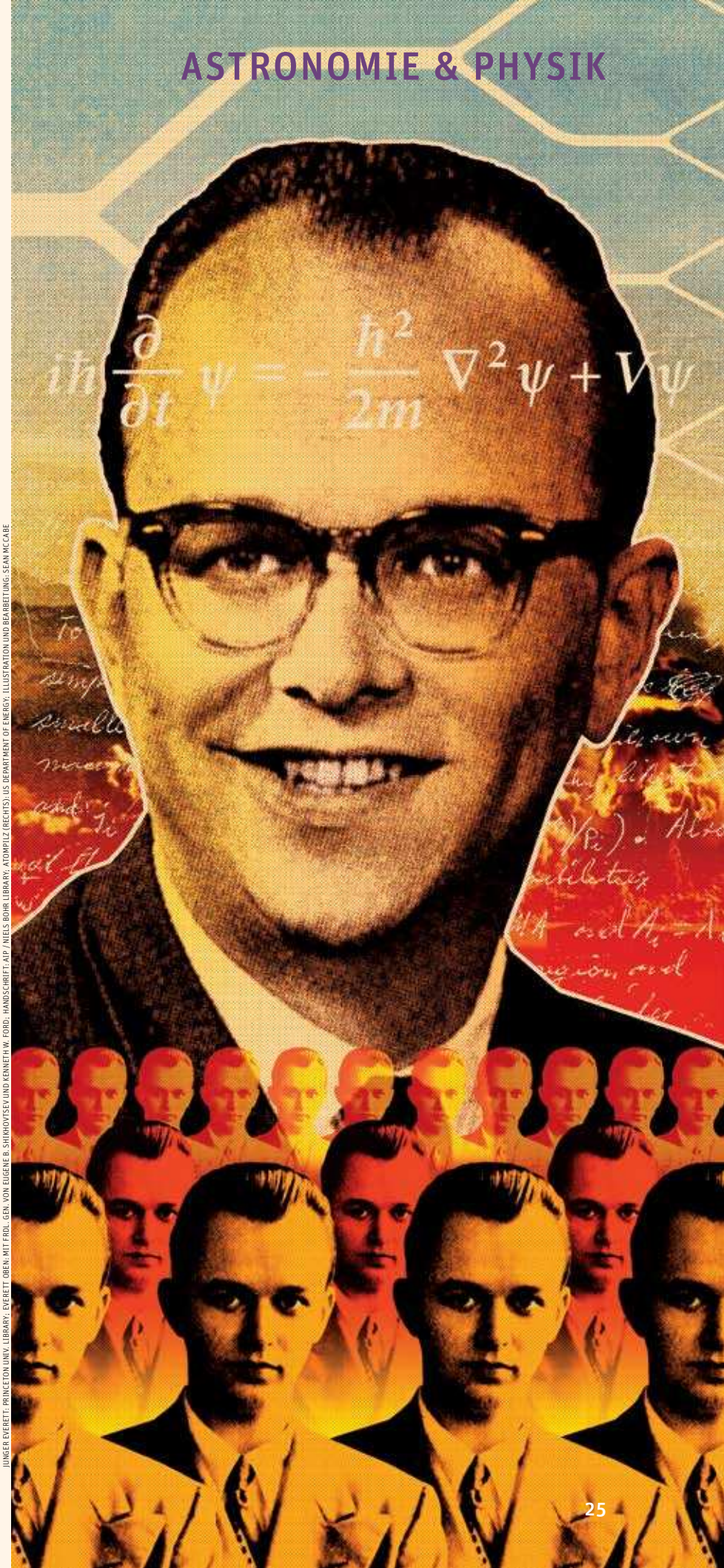
Dennoch kommen Wissenschaftler, wenn sie diese Eigenschaften präzise messen wollen, jedes Mal zu nur einem Ergebnis: Sie messen nur genau einen der möglichen Zustände. Auch haben sie nie ein makroskopisches Objekt in einem Superpositionszustand beobachtet. Das Problem läuft daher auf folgende Frage hinaus: Wie und warum geht die ganz konkrete und einmalige Welt unserer Erfahrung aus einer Vielzahl von Alternativen hervor, wie sie in der Quantenwelt der Überlagerungen existieren?

Um Quantenzustände zu beschreiben, verwenden Physiker so genannte Wellenfunktionen. Eine solche mathematische Formel stellt gewissermaßen eine Liste aller möglichen Konfigurationen eines Quantensystems dar. Außerdem enthält die Liste Werte, die für jede dieser Konfigurationen die Wahrscheinlichkeit angibt, dass wir genau diese bei einer Messung des Systems ermitteln. Welche dieser Konfigurationen wir aber tatsächlich messen, ist anscheinend Zufall. Die Wellenfunktion behandelt alle Elemente einer Superposition als gleichermaßen real, wenngleich nicht unbedingt als gleich wahrscheinlich.

Kollaps der Wellenfunktion

Eine weitere Formel, die Schrödinger-Gleichung, beschreibt, wie sich die Wellenfunktion eines Quantensystems im Lauf der Zeit verändert, nämlich stetig und deterministisch, das heißt, ohne dass der Zufall eine Rolle spielt. Doch diese elegante mathematische Form widerspricht dem, was Menschen beim Studium eines Quantensystems, beispielsweise eines Elektrons, wirklich messen. Denn im Moment der Messung scheint die Wellenfunktion, die eine Superposition von alternativen Zuständen beschreibt, in einen dieser Zustände zu »kollabieren«. Die stetige Entwicklung der Wellenfunktion wird unterbrochen, es kommt zu einer Diskontinuität und man erhält nur ein einzelnes Messergebnis. Alle anderen Möglichkeiten sind verschwunden, sie sind nicht mehr Teil unserer klassischen (nicht quantenmechanischen) Realität.

Welches Ergebnis die Messung hervorbringt, scheint dabei beliebig zu sein; aus den Informationen, die die Wellenfunktion des Elektrons über die Zeit *vor* der Messung enthält, lässt sich die Auswahl jedenfalls nicht ab-

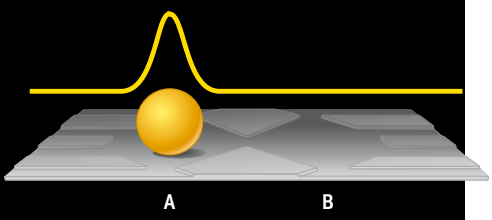


JUNGER EVERETT: PRINCETON UNIV. LIBRARY; EVERETT OBEN: MIT FRDL. GEN. VON EUGENE B. SHIKHOVTSEV UND KENNETH W. FORD; HANDSCHRIFT: AIP / NIELS BOHR LIBRARY; ATOMPILZ (RECHTS): US DEPARTMENT OF ENERGY; ILLUSTRATION UND BEARBEITUNG: SEAN MCCABE

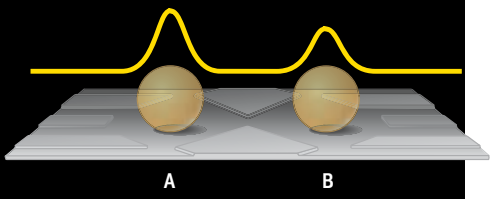
Nur ein Messproblem?

Noch ist die Quantenmechanik nicht zu einem umfassenden Verständnis des Verhältnisses gelangt, das zwischen den verwirrenden Quantenzuständen von Elementarteilchen und unserer eindeutigen klassischen Welt besteht.

Die Quantenmechanik beschreibt Zustände von Teilchen mittels einer so genannten Wellenfunktion. So hat beispielsweise die Wellenfunktion, die ein Teilchen, etwa ein Elektron, an einem Ort A repräsentiert, ein Maximum bei A und an allen anderen Orten den Wert null.



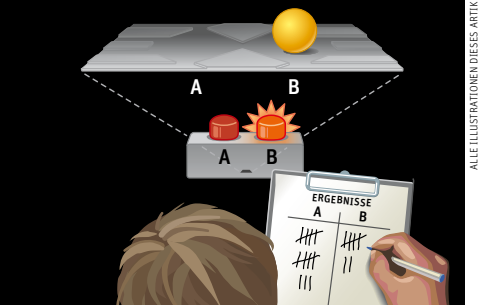
Ähnlich wie gewöhnliche Wellen können sich auch Wellenfunktionen überlagern. Die entstehende Superposition repräsentiert Teilchen, die sich gleichzeitig in mehr als einem Zustand befinden, zum Beispiel gleichzeitig an verschiedenen Orten. Die Größe der Amplitude jedes Wellenbergs an einem bestimmten Ort ist dabei mit der Wahrscheinlichkeit verknüpft, dass eine Messung genau diesen Ort oder Zustand ermittelt.



Man kann sich eine Wellenfunktion auch als Liste aller möglichen Zustände und der zugehörigen Wahrscheinlichkeiten vorstellen.

Position	Amplitude	Wahrscheinlichkeit
A	0,8	64 %
B	0,6	36 %

Misst ein Gerät ein Teilchen, das sich in einer Superposition von Zuständen befindet, liefert es ein eindeutiges Ergebnis – entweder A oder B –, nicht jedoch eine Kombination aus beiden Resultaten. Danach befindet sich das Teilchen nicht mehr in einem Superpositionszustand. Auch makroskopische Objekte wie zum Beispiel Fußbälle erleben wir niemals in Superposition.



ALLE ILLUSTRATIONEN DIESES ARTIKELS: JEN CHRISTIANSEN

leiten. Außerdem ergibt sich die Mathematik des Kollapses nicht aus dem Fluss der Schrödinger-Gleichung. Vielmehr muss der Kollaps der Wellenfunktion als Postulat hinzugefügt werden – als zusätzlicher diskontinuierlicher Prozess, der der kontinuierlichen Gleichung zu widersprechen scheint und sie gewissermaßen vorübergehend außer Kraft setzt.

Um das Messproblem in den Griff zu bekommen, hatten sich die meisten Mitbegründer der Quantenmechanik, insbesondere Bohr, Werner Heisenberg und John von Neumann, auf eine Interpretation der Quantenmechanik geeinigt. Ihre »Kopenhagener Deutung« postuliert, dass sich die Mechanik der Quantenwelt letztlich auf klassisch beobachtbare Phänomene reduzieren lässt – und nicht umgekehrt.

Dieser Ansatz privilegiert den außenstehenden Beobachter: Er wird in der klassischen Sphäre platziert, während sich das beobachtete Objekt in der Quantensphäre aufhält. Obwohl die Anhänger der Kopenhagener Deutung nicht zu erklären vermochten, welche Art von Grenze die beide Sphären voneinander trennt, erzielten sie mit Hilfe der Quantenmechanik große Fortschritte. Ganzen Generationen von Physikern wurde in der Folge beigebracht, dass die Gleichungen der Quantenmechanik nur in einem Teil der Realität, nämlich in ihrem mikroskopischen Teil, funktionieren, während sie in der makroskopischen Welt ihren Sinn verlieren. Und in der Tat: Dieses Wissen ist alles, was die meisten Physiker je benötigen.

Jede Kopie betrachtet sich als einmalig

Everett hingegen ging das Messproblem an, indem er die mikroskopische und die makroskopische Welt miteinander verschmolz. Er machte den Beobachter zu einem integralen Bestandteil des zu beobachtenden Systems. Zu diesem Zweck führte er die universelle Wellenfunktion ein, die Beobachter und Objekt miteinander in Beziehung setzt, indem sie beide als Bestandteile eines einzigen Quantensystems auffasst. Er beschrieb die makroskopische Welt also ebenfalls quantenmechanisch und stellte sich vor, dass auch makroskopische Objekte in einer Quantensuperposition existieren können. So kam seine Theorie ohne den postulierten Kollaps der Wellenfunktion aus und stand damit im Widerspruch zu den Auffassungen von Bohr und Heisenberg.

Revolutionär war Everett, weil er Fragen stellte wie diese: Was wäre, wenn die kontinuierliche Evolution der Wellenfunktion nicht vom Akt der Messung unterbrochen würde? Wenn die Schrödinger-Gleichung immer und auf alles anwendbar wäre – auf Objekte ebenso wie auf Beobachter? Wenn die Zustände einer Wellenfunktion, die einander in einer Superposition überlagern, auch im Fall einer Messung nicht aus der Realität verschwänden?

Er erkannte, dass sich unter diesen Voraussetzungen die Wellenfunktion eines Beobachters bei jeder Interaktion mit einem Quantenobjekt, bei dem eine Superposition vorliegt, aufspalten würde. Die universelle Wellenfunktion würde Zweige enthalten und jeder Zweig entspräche einer der Alternativen in dem Superpositionszustand des Objekts. Jede Verzweigung enthielte also eine Kopie des Beobachters – und jeder dieser Beobachter erhielte jeweils ein anderes der möglichen Ergebnisse als Resultat seiner Messung. Zu den Grundeigenschaften der Schrödinger-Gleichung zählt, dass sich Verzweigungen, sobald sie entstanden sind, nicht mehr wechselseitig beeinflussen. Daher steht jeder Zweig für eine eigene, von allen anderen unabhängige Zukunft.

Nehmen wir eine Person, die ein Teilchen misst, das sich in einer Superposition von zwei Zuständen befindet – etwa ein Elektron in der Superposition von Ort A und Ort B. Im einen Zweig der universellen Wellenfunktion stellt eine Kopie der Person fest, dass sich das Teilchen am Ort A befindet. In einem nahezu identischen anderen Zweig stellt eine andere Kopie dieser Person fest, dass sich dasselbe Teilchen am Ort B befindet. Jede Kopie betrachtet sich als einmalig und sieht ihre Realität als zufällige Auswahl aus mehreren physikalischen Möglichkeiten – obwohl in der vollständigen Realität jede dieser Möglichkeiten wirklich wird. Der Verzweigungsprozess ist indessen unabhängig von der Anwesenheit eines Beobachters. Vielmehr spaltet sich bei jeder Interaktion zwischen physikalischen Systemen die Wellenfunktion des gesamten Systems im Allgemeinen auf.

Die heute gängige Vorstellung der Art und Weise, wie die Zweige anschließend voneinander unabhängig werden – wobei »uns« jede Alternative als die vertraute klassische Realität erscheint –, wird von der Dekohärenz-Theorie beschrieben. Diese ist zwar akzeptierter Bestandteil der modernen Quantentheorie, nicht jeder allerdings stimmt der Everett'schen Interpretation zu, dass alle Zweige real sind.

Everett war nicht der erste Physiker, der das Kollaps-Postulat der Kopenhagener Deutung als unzulänglich kritisierte. Doch er betrat neues Terrain, indem er allein aus den Gleichungen der Quantenmechanik eine mathematisch konsistente Theorie der universellen Wellenfunktion ableitete. Die Existenz multipler Universen ergab sich aus dieser Theorie als logische Folge, sie war keine bloße Behauptung. Eine Fußnote seiner Dissertation enthält den Satz: »Aus der Sicht dieser Theo-

rie sind alle Elemente einer Superposition (alle ›Zweige‹) tatsächlich vorhanden, keine ist ›realer‹ als der Rest.«

Das Manuskript, das all diese Ideen enthielt, löste hinter den Kulissen einen bemerkenswerten Streit aus. Dies entdeckte Olival Freire jr., Wissenschaftshistoriker an der Universidade Federal im brasilianischen Bahia, vor rund fünf Jahren bei Archivrecherchen. Im Frühjahr 1956 hatte Everetts Doktorvater in Princeton, John Archibald Wheeler, das Manuskript mit nach Kopenhagen genommen, um die Dänische Wissenschaftsakademie von einer Veröffentlichung zu überzeugen. Mit Bohr und Petersen, so berichtete er Everett in einem Brief, führte er dort »drei lange und harte Diskussionen«. Außerdem legte Wheeler die Arbeit seines Studenten einigen anderen Physikern an Bohrs Institut für Theoretische Physik vor, darunter Alexander W. Stern.

Eine philosophische Ungeheuerlichkeit

In seinem Brief schrieb Wheeler: »Dein schöner Formalismus der Wellenfunktionen bleibt natürlich unberührt. Das eigentliche Problem scheinen uns allen jedoch die Begriffe zu sein, die wir für die mathematischen Größen dieses Formalismus finden müssen.« Von Gegenständen zu sprechen, die sich in »Kopien« verzweigten – dies war eine für Wheeler höchst zweifelhafte wissenschaftliche Metapher. Sein Brief offenbarte das Unbehagen, das die Kopenhagener angesichts Everetts Arbeit empfanden. Stern etwa kanzelte sie als »Theologie« ab, woraufhin Wheeler ihm in einem langen, diplomatischen Brief Everetts Theorie auseinandersetzte und sie als Erweiterung – nicht als Widerlegung – der vorherrschenden Interpretation der Quantenmechanik entschuldigte:

»Ich glaube, dass dieser sehr fähige und unabhängig denkende junge Mann allmählich dahin gelangt ist, die gegenwärtigen Ansätze zur Lösung des Messproblems als korrekt und in sich konsistent zu akzeptieren, obwohl seinem Manuskript einige Spuren einer früheren zweifelnden Haltung verblieben sind. Um mögliche Missverständnisse zu vermeiden, möchte ich daher feststellen, dass Everetts Arbeit die gegenwärtige Deutung des Messproblems nicht *in Frage stellen*, sondern akzeptieren und *verallgemeinern* möchte.« (Hervorhebung im Original)

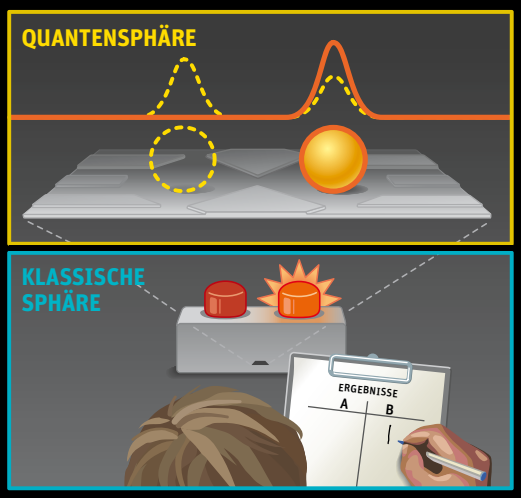
Everett hätte dieser Wheeler'schen Darstellung scharf widersprochen. So schrieb er beispielsweise ein Jahr später, in einer Antwort auf Kritik des theoretischen Physikers Bryce S. DeWitt, eines der Begründer der Quanten-

Ein Problem … (mindestens) zwei Lösungen

Die Kopenhagener Deutung und Everetts Viele-Welten-Interpretation lösen das Messproblem auf zwei grundlegend verschiedene Arten. (Zudem existieren weitere Lösungsansätze.)

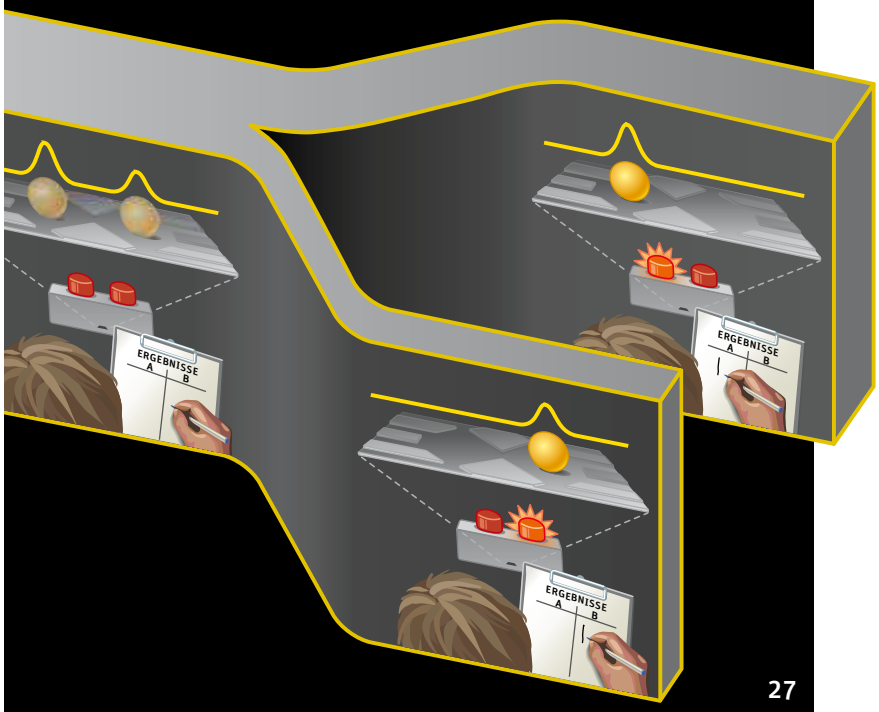
DIE KOPENHAGENER DEUTUNG

Niels Bohr und anderen zufolge befinden sich Messgerät und Beobachter in der Sphäre der klassischen Realität, die sich von der Quantensphäre unterscheidet. Misst ein klassischer Apparat einen Superpositionszustand, kollabiert die Wellenfunktion zufällig in eine der in der Superposition enthaltenen Alternativen. Alle anderen Alternativen verschwinden aus der Realität. Warum es zu einem solchen Kollaps kommt, erklären die Gleichungen der Quantenmechanik jedoch nicht; seine Existenz wurde als separates Postulat hinzugefügt.



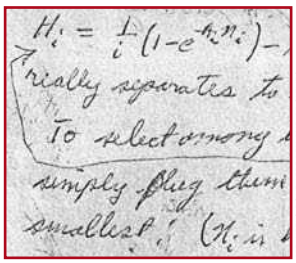
VIELE-WELTEN-INTERPRETATION

Everetts bahnbrechende Neuerung bestand darin, auch Messinstrument und Beobachter als Quantensysteme zu betrachten, die ebenfalls den Gleichungen und Prinzipien der Quantenmechanik gehorchen. Aus seiner Analyse schloss er, dass auch das Ergebnis des Messvorgangs eine Superposition unterschiedlicher Resultate ist – und dass die einzelnen Elemente dieser Superposition jeweils einer Verzweigung des Universums entsprechen. Wir selbst nehmen diese Superposition der Makrowelt(en) nicht wahr, weil jede Kopie von uns immer nur das wahrnimmt, was in ihrem jeweiligen Zweig geschieht.



EVERETTS LEBEN

11. November 1930: Everett wird in Washington D.C. geboren.
1943: Albert Einstein beantwortet einen Brief, den ihm Everett schrieb. Darin geht es um eine unendlich hohe Kraft, die auf ein unbewegliches Objekt wirkt.
Herbst 1953: Everett beginnt sein Graduiertenstudium in Princeton. Bei Eugene Wigner und John Archibald Wheeler studiert er Quantenmechanik.
ab Juni 1956: Forschertätigkeit im WSEG-Team des Pentagons
November 1956: Heirat mit Nancy Gore; Ernennung zum Leiter der Mathematik-Abteilung am WSEG
Juni 1957: Everett erhält den Doktortitel (Ph.D.)
Juli 1957: Geburt der Tochter Elizabeth
Frühjahr 1959: Everett verfeinert den »Everett-Algorithmus« zur Lösung komplexer logistischer Probleme.


really separates to
to select among
simply plug them
smallest!

AIP, NIELS BOHR LIBRARY AND ARCHIVES

1959 bis 1960: Mitarbeit am Entwurf des »WSEG No. 50«-Reports über militärische Nuklearstrategien
Januar 1961: Everett weist Verteidigungsminister Robert McNamara in die WSEG-Analysen nuklearer Strategien ein.
April 1963: Geburt des Sohnes Mark
April 1964: Everett gründet mit anderen WSEG-Mitarbeitern die Firma Lambda Corporations.
1973: Er verlässt Lambda und gründet das Datenverarbeitungsunternehmen DBS.
19. Juli 1982: Everett stirbt im Schlaf an einem Herzinfarkt.

gravitation: »(Die) Kopenhagener Deutung ist hoffnungslos unvollständig, da sie a priori auf klassischer Physik basiert … und überdies eine philosophische Ungeheuerlichkeit ist, die für die makroskopische Welt einen ›Realitäts‹-Begriff kennt, den sie aber für den Mikrokosmos ablehnt.«

Während sich Wheeler in Europa für Everett einsetzte, drohte diesem in den USA die Einberufung zum Wehrdienst; wegen seines Studiums hatte man ihm bis dahin Aufschub gewährt. Um nicht abkommandiert zu werden, entschloss sich der junge Theoretiker, eine Forschungsstelle am Pentagon anzunehmen. Kurz darauf packte er seine Sachen und zog nach Washington D.C. Zur theoretischen Physik kehrte Everett nie wieder zurück.

Im folgenden Jahr jedoch, während er seine Dissertation widerwillig auf ein Viertel ihrer ursprünglichen Länge zusammenkürzte, telefonierte er häufig mit Wheeler. Im April 1957 akzeptierte Everetts Promotionsausschuss die gekürzte Version – ohne »Verzweigungen«. Wiederum drei Monate später veröffentlichte der »Review of Modern Physics« diese Fassung unter dem Titel »Formulierung der Quantenmechanik mit Hilfe ›Relativer Zustände‹« (»›Relative State‹ Formulation of Quantum Mechanics«), gemeinsam mit einem lobenden Beitrag seines Doktorvaters Wheeler.

Als die Arbeit erschien, nahm jedoch kaum jemand Notiz von ihr und Wheeler distanzierte sich allmählich von Everetts Theorie. Allerdings hielt er weiterhin den Kontakt aufrecht und ermutigte seinen ehemaligen Doktoranden, weiter über die Quantenmechanik zu forschen. Everett allerdings war »enttäuscht, vermutlich sogar verbittert«, wie Wheeler 2006 in einem Interview sagte – er war damals 95 –, »dass es keine Resonanz auf seine Arbeit gab. Hätte ich nur weiter mit ihm diskutieren können. Er hat wichtige Fragen gestellt«.

Princeton promovierte Everett etwa ein Jahr, nachdem er seine Arbeit für das Pentagon aufgenommen hatte. Zu seinen Aufgaben im US-Verteidigungsministerium gehörten Berechnungen, mittels derer sich die Mortalitätsraten infolge radioaktiven Fall-outs bei Atomkriegen ermitteln ließen. Schon bald leitete er auch die Mathematikabteilung der nach außen hin wenig bekannten, aber äußerst einflussreichen Weapons Systems Evaluation Group (WSEG), die sich mit der strategischen Bewertung von Waffensystemen beschäftigte. Everett beriet hochrangige Vertreter der Eisenhower- und Kennedy-Regierung, darunter US-Verteidigungsminister Robert McNamara. Welche Ziele eignen sich optimal für den Einsatz von Wasserstoffbomben? Wie muss die nukleare Triade aus Bombenflugzeugen, U-Booten und Raketen strukturiert werden, um einen möglichst wirksamen Schlag zu führen?

Im Jahr 1960 half er beim Verfassen des »WSEG No. 50«, eines militärischen Berichts, der bis heute unter Geheimhaltung steht und große Wirkung entfaltete. Everetts Freund und WSEG-Kollege George E. Pugh vermutet ebenso wie weitere Historiker, dass darin militärische Strategien entwickelt wurden, wie sie dann von den USA jahrzehntelang verfolgt wurden, darunter die Doktrin der wechselseitig gesicherten Zerstörung. Die WSEG lieferte den Nuklearstrategen des Pentagons genügend Furcht erregende Informationen über die weltweiten Auswirkungen radioaktiven Fall-outs, um viele von den Vorzügen einer nuklearstrategischen Patt-Situation zu überzeugen – ein Gegenmodell zu dem von einigen einflussreichen Fürsprechern propagierten »präemptiven Erstschlag« gegen die Sowjetunion, China oder andere kommunistische Staaten.

Algorithmus auf dem Hotelbriefpapier

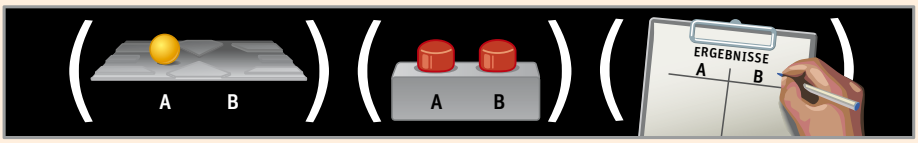
In diese Jahre fällt auch eines der letzten Kapitel im Streit um Everetts Theorie. Im Frühjahr 1959 empfing Bohr Everett zu einem Gespräch in Kopenhagen. Sechs Wochen lang trafen sie sich mehrmals, doch weder wich Bohr von seiner Position ab noch kehrte Everett in die Quantenforschung zurück. Völlig ergebnislos blieb der Besuch dennoch nicht. An einem Nachmittag saß Everett im Kopenhagener Hotel Østerport über einem Glas Bier und notierte auf dem hauseigenen Briefpapier eine wichtige Verfeinerung seines zweiten mathematischen Meisterstücks, die auch als Everett-Algorithmus bekannte »verallgemeinerte Lagrange-Multiplikation«. Die Methode vereinfacht die Suche nach optimalen Lösungen für komplexe logistische Probleme – von der Aufstellung nuklearer Waffen über »just-in-time«-Produktion in der Industrie bis hin zu Tourenplänen für US-Schulbusse, die die bestmögliche Trennung ethnischer Gruppen gewährleisten.

1964 gründeten Everett, Pugh und einige ihrer WSEG-Kollegen die Lambda Corporation. Seine Mitarbeiter entwickelten unter anderem mathematische Modelle für antiballistische Raketensysteme sowie Computerprogramme, die einen Atomkrieg simulierten und laut Pugh in Militärkreisen jahrelang verwendet wurden.

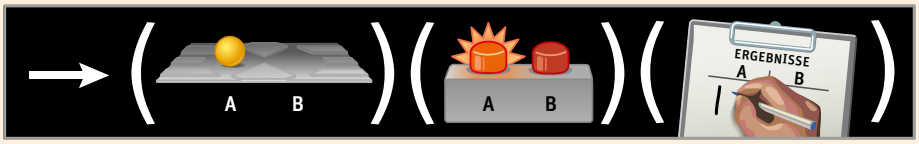
Everett selbst ließ sich damals von der Entwicklung neuer Anwendungen des Bayes-Theorems fesseln. Das mathematische Verfahren ermöglicht es, die Wahrscheinlichkeiten zukünftiger Ereignisse mit früheren Erfahrungs-

Der mathematische Weg zu den »Vielen Welten«

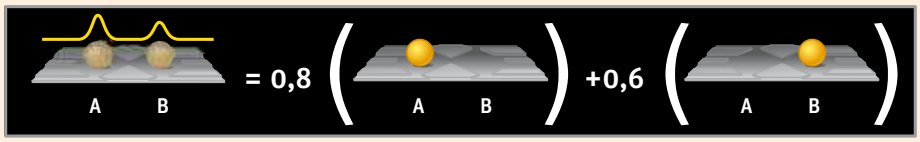
Everett nahm an, dass alles, was existiert, sich als Quantensystem beschreiben lässt und der Schrödinger-Gleichung gehorcht. Er untersuchte Vorgänge, bei denen Messgeräte und Beobachter mit Quantenobjekten wechselwirken, die sich in einer Superposition befinden. Dabei entwickelte er die mathematischen Grundlagen für eine »universelle Wellenfunktion«, die den Quantenzustand des Objekts, des Messgeräts und des Beobachters umfasst. Werden diese drei Größen miteinander multipliziert, ergibt sich der Gesamtzustand, wie unten gezeigt wird:



Hier befindet sich das Teilchen mit hundertprozentiger Wahrscheinlichkeit am Ort A, bevor die Messung durchgeführt wird. In diesem Fall (der ohne verwirrende Superpositionen auskommt) beschreibt die Schrödinger-Gleichung, wie der Anfangszustand in einen Endzustand übergeht, der keine Mehrdeutigkeiten aufweist: Die Wechselwirkung zwischen dem Teilchen und dem Messgerät führt zum Aufleuchten der »A«-Anzeige. Das Licht wandert zum Beobachter, der feststellt, dass die »A«-Anzeige aufleuchtet (unten).



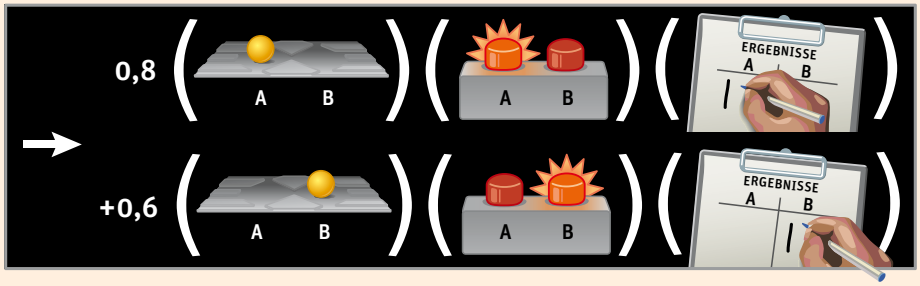
Auch wenn sich das Teilchen exakt am Ort B befindet, führt der Messprozess zu einem eindeutigen Ergebnis. (Der dargestellte Vorgang ist stark idealisiert, was jedoch die Schlussfolgerungen nicht beeinträchtigt.) Was aber geschieht, wenn sich das Teilchen in einer Superposition befindet, bevor die Messung durchgeführt wird? Mathematisch werden Superpositionen als Summen dargestellt:



Die im Beispiel genannten Zahlen entsprechen einer 64-prozentigen Wahrscheinlichkeit ($0{,}8^2$), dass man Ergebnis A erhält, und einer 36-prozentigen Wahrscheinlichkeit ($0{,}6^2$) für das Ergebnis B.
Fügt man obige Summe in den Anfangszustand von Objekt, Messgerät und Beobachter ein, erhält man als Ergebnis den Gesamtzustand, der selbst eine Superposition aus zwei Alternativen ist:

(0,8 A + 0,6 B) x Messgerät x Beobachter =
0,8 (A x Messgerät x Beobachter) + 0,6 (B x Messgerät x Beobachter)

Dank der Linearität der Schrödinger-Gleichung entwickelt sich nun jede Komponente (das heißt die Elemente zu beiden Seiten des »+«-Zeichens) dieses Zustands genau so, wie sie es täte, wenn sie allein vorhanden wäre. Daher ist der gesamte Endzustand eine Superposition der einzelnen Endzustände, bei denen sich das Teilchen an einer jeweils exakt definierten Position befindet.



Die Linearität und eine weitere als Orthogonalität bezeichnete Eigenschaft der Zustände gewährleisten, dass sich diese beiden Teile der Wellenfunktion im zeitlichen Verlauf niemals wechselseitig beeinflussen. Mittlerweile lässt sich dieser Sachverhalt durch die Dekohärenz-Theorie noch detaillierter beschreiben. Die »A«-Verzweigung, in der sich ein Beobachter vollkommen sicher ist, dass die »A«-Anzeige aufgeleuchtet hat, verhält sich so, als wäre sie die gesamte Wellenfunktion, ebenso die »B«-Verzweigung. Bildhaft kann man sich dies als ein Universum vorstellen, das sich in unterschiedliche Verzweigungen mit jeweils eigener Geschichte aufspaltet. Diese Verzweigungen sind keine willkürliche Behauptung, sondern lassen sich vollständig auf mathematischem Weg herleiten. Everett wies weiterhin nach, dass dieser mathematische Ansatz auch in komplizierteren Situationen gültig bleibt, etwa bei mehreren Messungen und Beobachtern.

Noch immer aber ist ein viel diskutiertes Rätsel ungelöst: In welchem Sinn kann man davon sprechen, dass es in 64 Prozent aller Fälle zur Verzweigung A und in 36 Prozent aller Fälle zur Verzweigung B kommt? Was genau geschieht im Moment dieser »Auswahl« oder »Entscheidung«?

Graham P. Collins ist Redakteur von Scientific American

Der Werdegang seiner Theorie

Winter 1954 – 1955: Everett beginnt mit der Niederschrift seiner quantenphysikalischen Dissertation.
Januar 1956: Unter dem Titel »The Theory of the Universal Wave Function« reicht er die Arbeit ein.
Frühjahr 1956: Wheeler diskutiert das Rohmanuskript der Dissertation mit Niels Bohr und anderen führenden Physikern. Sie zeigen sich ablehnend.
August 1956 – März 1957: Wheeler und Everett überarbeiten das Rohmanuskript und kürzen es.
April 1957: Der Promotionsausschuss akzeptiert die gekürzte Arbeit »›Relative State‹ Formulation of Quantum Mechanics«.
Juli 1957: Die »Reviews of Modern Physics« publizieren die gekürzte Arbeit gemeinsam mit einer lobenden Rezension Wheelers.
Frühjahr 1959: Everett trifft Bohr in Kopenhagen, doch beide beharren auf ihren theoretischen Standpunkten.
1970: Dieter Zeh (siehe Beitrag auf S. 32) veröffentlicht eine wegweisende Arbeit über Dekohärenz, in der er sich auch auf Everetts Arbeit bezieht.
September 1970: In »Physics Today« veröffentlicht Everetts ehemaliger Kritiker Bryce S. DeWitt den Überblicksartikel »Quantum Mechanics and Reality«, in dem er sich für Everetts Theorie stark macht.
1973: DeWitt und Neill Graham veröffentlichen beide Versionen der Dissertation in einem Buch.
Dezember 1976: Das Science-fiction-Magazin »Analog« macht Everetts Thesen in den USA populär.
Juli 1985: David Deutsch schlägt Quantencomputer vor, in denen Everetts Thesen praktischen Einsatz finden könnten.
Juli 2007: 50. Jahrestag des Erscheinens von Everetts Arbeit in den »Reviews of Modern Physics«. Die Universität Oxford widmet dem Ereignis eine Konferenz und »Nature« hebt die »Vielen Welten« auf die Titelseite.

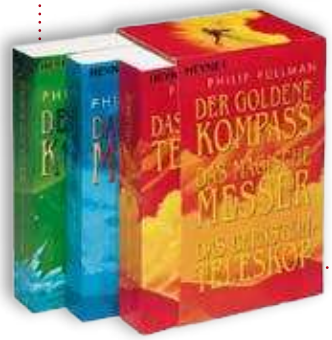
VIELE (ROMAN-)WELTEN

Auch viele Sciencefiction-Romane griffen die Idee multipler Universen auf. Hier eine kleine Auswahl:

- **The Coming of the Quantum Cats. Von Frederik Pohl (Spectra, 1986; nur englisch, nur antiquarisch)**. Der vielfach ausgezeichnete US-Sciencefiction-Autor beschreibt hier die Invasion Amerikas durch eine Kopie Amerikas.

- **Quarantäne. Von Greg Egan (Lübbe, 1993; nur antiquarisch).** Was geschähe, wenn sich der Moment unmittelbar vor dem Quantenkollaps gewissermaßen einfrieren ließe und man – in diesem Fall Privatdetektiv Nick Stavrianos – die Kontrolle über eine Unzahl von Alternativen hätte?

- Auch in Philip Pullmans **Fantasy-Trilogie (Der goldene Kompass/Das magische Messer/Das Bernstein-Teleskop; Carlsen, 2007)**, die in mehreren Parallelwelten spielt, spekulieren »experimentelle Theologen« über die Existenz multipler Universen. Selbst Everetts Name fällt. »Der goldene Kompass« kam jüngst auch ins Kino.



werten in Beziehung zu setzen. 1971 baute er den Prototyp einer Bayes'schen Maschine. Ein solches Computerprogramm lernt, ähnlich dem »gesunden Menschenverstand«, aus Erfahrung und erleichtert Entscheidungsprozesse, indem es die möglichen Folgen von Entscheidungen ermittelt. Im Auftrag des Verteidigungsministeriums setzte Lambda diese Methode auch für Verfahren ein, mittels derer sich Flugbahnen herannahender ballistischer Raketen verfolgen ließen.

1973 verließ Everett das Unternehmen und gründete gemeinsam mit seinem Lambda-Kollegen Donald Reisler die Datenverarbeitungsfirma DBS. Auch dabei ging es zum Teil um militärische Anwendungen, doch dann spezialisierte sich DBS auf die Analyse sozioökonomischer Folgen von Affirmative-Action-Programmen. Im Rahmen solcher von Bürgerrechtsbewegungen auf den Weg gebrachten Programme hatten US-Universitäten Quotenregelungen eingeführt, die der Gleichstellung ethnischer Minderheiten dienten.

Bei ihrem ersten Treffen, erinnerte sich Reisler, habe ihn Everett ein wenig kleinlaut gefragt, ob er seine Publikation aus dem Jahr 1957 gelesen hätte. »Ich musste kurz nachdenken und sagte dann: ›Mein Gott, Sie sind *der* Everett, der Verrückte, der diesen geisteskranken Artikel geschrieben hat!‹« Die beiden wurden enge Freunde, vereinbarten aber, nie wieder über multiple Universen zu sprechen.

Trotz aller Erfolge ging vieles in Everetts Leben schief. Er hatte den Ruf eines Trinkers, und seine Freunde sprachen von einem wachsenden Alkoholproblem. Reisler zufolge nahm sein Partner gewöhnlich einen »Lunch« aus drei Martinis zu sich und schlief sich anschließend in seinem Büro aus. Produktiv sei er dennoch geblieben.

Sein Hedonismus war jedoch nicht das Resultat einer entspannten oder verspielten Haltung gegenüber dem Leben. »Everett war nicht sympathisch«, sagt Reisler. »Er analysierte die Dinge mit kalter, brutaler Logik. Bürgerrechtsforderungen machten aus seiner Sicht keinen Sinn.« Der frühere WSEG-Kollege John Y. Barry stellt auch Everetts Geschäftsethik in Frage. Mitte der 1970er Jahre überredete Barry seine Vorgesetzten bei der Investmentbank J. P. Morgan, Everett mit der Entwicklung einer Bayes'schen Methode zur Vorhersage von Aktienkursen zu beauftragen. Mehrere Quellen berichten, dass Everetts Software erfolgreich arbeitete, er sich dann aber weigerte, sie J. P. Morgan zu überlassen. »Er nutzte uns aus«, sagt Barry: Er war »ein brillanter, innovativer, gerissener, unzuverlässiger und vermutlich alkoholkranker Mensch«. Zudem war er egozentrisch. »Hugh trat gern für eine extreme Form des Solipsismus ein«, sagt die frühere DBS-Angestellte Elaine Tsiang. »Obwohl er sich Mühe gab, seine (Viele-Welten-)Theorie von anderen Theorien des Geistes oder des Bewusstseins abzugrenzen, verdankten wir unsere Existenz offenbar alle der Welt, wie er sie entworfen hatte.«

Nur eine menschliche Schöpfung?

Während Everett seine Unternehmerkarriere verfolgte, begannen Physiker, einen genaueren Blick auf seine einst ignorierten Theorien zu werfen. Everetts ehemaliger Kritiker Bryce S. DeWitt wurde zu ihrem glühendsten Verfechter. 1967 veröffentlichte der theoretische Physiker einen Artikel, in dem er die Wheeler-DeWitt-Gleichung vorstellte: eine universelle Wellenfunktion, der eine Theorie der Quantengravitation genügen müsste. Everett sei es gewesen, der die Notwendigkeit eines solchen Ansatzes aufgezeigt habe. Später gaben DeWitt und sein Student Neill Graham ein Buch mit Fachbeiträgen heraus: »The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics« (»Die Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik«). Es enthielt unter anderem die ungekürzte Fassung von Everetts Doktorarbeit. Und eine 1976 erschienene Story im US-Sciencefiction-Magazin »Analog« sorgte dafür, dass die »Vielen Welten« auch ein breiteres Publikum erreichten.

Für viele Wissenschaftler kommt es dennoch nicht in Frage, die Kopenhagener Deutung aufzugeben. N. David Mermin, Physiker an der Universität Cornell, behauptet, dass die Everett-Interpretation die Wellenfunktion als Teil der objektiv realen Welt behandelt, während sie tatsächlich nur ein mathematisches Werkzeug sei. »Die Wellenfunktion ist eine menschliche Schöpfung und soll uns in die Lage versetzen, unseren makroskopischen Betrachtungen einen Sinn zu geben«, sagt Mermin. »Meine Sicht ist das exakte Gegenteil der Viele-Welten-Interpretation. Die Quantenmechanik ist ein Hilfsmittel; sie verleiht unseren Beobachtungen Kohärenz. Die Behauptung aber, wir befänden uns gewissermaßen ›im Inneren‹ der Quantenmechanik und sie müsse sich auf unsere Wahrnehmung anwenden lassen, ist inkonsistent.«

Zahlreiche Physiker sind dennoch der Ansicht, dass Everetts Theorie ernst genommen werden sollte. »Als ich Ende der 1970er Jahre von Everetts Interpretation hörte«, sagt Stephen Shenker, theoretischer Physiker an der Universität Stanford, »hielt ich sie irgendwie für verrückt. Inzwischen verfolgen die meisten meiner Kollegen aus der Stringtheorie und der Quantenkosmologie Ansätze im Stile der Everett-Interpretation. Und angesichts der jüngs-

ten Entwicklungen auf dem Gebiet der Quantencomputer sind diese Fragen auch nicht mehr rein akademisch.«

Für Wojciech H. Zurek am Los Alamos National Laboratory, einen der Pioniere auf dem Gebiet der Dekohärenz, liegt »Everetts Errungenschaft darin, dass er auf einer universellen Quantentheorie bestand. Das Universum darf nicht in Sphären aufgeteilt werden, die a priori klassisch beziehungsweise quantenphysikalisch sind. Ihm ist es zu verdanken, dass wir die Quantentheorie heute nutzen können, um Messungen als Ganzes, als Einheit (von Objekt und Beobachter) zu beschreiben«.

Und Juan Maldacena, Stringtheoretiker am Institute for Advanced Study in Princeton, vertritt eine auch für viele seiner Kollegen typische Einstellung: »Denke ich über Everetts Theorie im Rahmen der Quantenmechanik nach, ist sie das Vernünftigste, an das man glauben kann. Im Alltag glaube ich aber nicht daran.«

1977 präsentierte Everett, der öffentliche Vorträge eigentlich hasste, auf Einladung von DeWitt und Wheeler seine Thesen an der Universität von Texas in Austin. Er trug einen zerknitterten schwarzen Anzug und rauchte während des gesamten Seminars eine Zigarette nach der anderen. Zu den Anwesenden zählte auch David Deutsch, der heute an der Universität Oxford lehrt. Er zählt zu den Gründungsvätern des Forschungsgebiets der Quantencomputer (das seinerseits von Everetts Theorie inspiriert worden war). »Everett war seiner Zeit voraus«, sagt Deutsch. »Er steht für die Weigerung, objektive Erklärungen preiszugeben. Dem Fortschritt in Physik und Philosophie hat es sehr geschadet, dass sie ihren eigentlichen Zweck aus dem Auge verloren, nämlich die Welt zu erklären. Wir waren unrettbar im Sumpf von Formalismen versunken und betrachteten manches, was nichts erklärte, als Fortschritt. Das entstandene Vakuum füllten wir mit Mystizismus, Religion und allerlei Unsinn. Everett ist wichtig, weil er sich dagegen auflehnte.« Anschließend versuchte Wheeler, Everett für das Institut für Theoretische Physik der Universität von Kalifornien in Santa Barbara zu begeistern. Angeblich zeigte dieser zwar Interesse, Erfolg war Wheelers Plan dennoch nicht beschieden.

Am 19. Juli 1982 starb Everett im Schlaf. Er war erst 51. Seine Kinder Elizabeth und Mark hatte er kaum gekannt. Mark, damals ein Teenager, erinnert sich, dass er seinen Vater morgens leblos im Bett vorfand. Als er den kalten Körper berührte, konnte er sich nicht erinnern, seinen Vater jemals zuvor angefasst zu haben. »Ich wusste nicht, was ich empfinden sollte«, sagte er mir. »Ich hatte wirklich keinerlei Beziehung zu ihm.«

Wenig später zog Mark nach Los Angeles. Dort wurde er als Song-Schreiber und Lead-Sänger der Rockband Eels erfolgreich. In vielen seiner Lieder spiegelt sich die Traurigkeit, die er als Sohn eines depressiven, alkoholkranken und emotional unerreichbaren Mannes empfunden haben musste. Von Everetts Karriere und seinen Errungenschaften erfuhr Mark erst Jahre nach dem Tod des Vaters.

AIP, ESVA / ALAN RICHARDS

Im November 1954 trafen sich Niels Bohr (Mitte) und Hugh Everett (2. von rechts) in Princeton. Im gleichen Jahr hatte Everett die Idee zu seiner Viele-Welten-Theorie, die Bohr allerdings niemals akzeptierte. Außerdem im Bild: Charles W. Misner, Hale F. Trotter und David K. Harrison (von links nach rechts)

»Alle Hoffnung preisgeben«

Everetts Tochter Elizabeth hatte bereits im Juni 1982, einen Monat vor dem Tod ihres Vaters, den ersten von mehreren Selbstmordversuchen unternommen. Mark fand seine Schwester bewusstlos auf dem Boden des Badezimmers liegend und brachte sie gerade noch rechtzeitig ins Krankenhaus. Als er am selben Abend wieder nach Hause kam, blickte sein Vater beim Lesen der Zeitung auf und sagte: »Ich wusste nicht, dass sie so traurig ist.« 1996 brachte sich Elizabeth mit einer Überdosis Schlaftabletten um. Auf einen Zettel in ihrer Brieftasche hatte sie geschrieben, dass sie ihrem Vater in ein anderes Universum folgen wolle.

In Marks Song *Things the Grandchildren should know* (Was Enkelkinder wissen sollten) aus dem Jahr 2005 heißt es: »Ich habe niemals wirklich verstanden / wie es für ihn wohl war / im Innern seines Kopfes zu leben.« Sein solipsistisch veranlagter Vater hätte dieses Dilemma verstanden. »Haben wir erst einmal zugegeben, dass jede physikalische Theorie im Grunde nur ein Modell für die Welt der Erfahrung ist«, so schloss die ungekürzte Fassung von Everetts Doktorarbeit, »müssen wir alle Hoffnung preisgeben, so etwas wie *die* korrekte Theorie zu finden … schlicht darum, weil uns die Totalität der Erfahrung niemals zugänglich ist.« ◁

Peter Byrne (www.peterbyrne.info) arbeitet als Journalist in Nordkalifornien und schreibt eine umfassende Biografie über Hugh Everett. Er dankt insbesondere Eugene Shikhovtsev, der als erster Historiker das Leben Everetts studierte und seine Ergebnisse großzügig zur Verfügung stellte. Außerdem dankt er dem American Institute of Physics für finanzielle Unterstützung; George E. Pugh und Kenneth Ford für ihren Rat; und den Physikern, die die wissenschaftlichen Passagen in der amerikanischen Originalfassung dieses Beitrags gegenlasen: Stephen Shenker, Leonard Susskind, David Deutsch, Wojciech H. Zurek, James B. Hartle, Cecile DeWitt-Morette und Max Tegmark.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/943416.

Von »Vielen Welten« zur Quantendekohärenz?

Von H. Dieter Zeh

Im Artikel über »Die Parallelwelten des Hugh Everett« (S. 24) schreibt der Autor Peter Byrne, Everetts Vielwelten-Interpretation der Quantenphysik aus den 1950er Jahren nehme gewisse Züge der Quantendekohärenz vorweg. Ein Zusammenhang besteht aber eher in umgekehrter Richtung. In meiner von ihm erwähnten Arbeit von 1970 habe ich ausdrücklich für eine Everett-Interpretation plädiert – zunächst ohne Everetts Arbeit zu kennen. Das, was man heute Dekohärenz nennt, war dabei nur ein Hilfsargument. Deswegen betrachte ich die experimentell vielfach bestätigte Dekohärenz auch als eine indirekte Bestätigung der »Vielen Welten«.

Ebenso wie Everett konnte ich nicht akzeptieren, dass man in der pragmatischen Kopenhagener Interpretation ständig zwischen Quantenzuständen und klassischen – das heißt nicht quantenphysikalischen – Begriffen wechselt. Die breite experimentelle Bestätigung der Quantentheorie legte schon damals die Hypothese nahe, dass die Schrödinger-Wellenfunktion universell gültig sein müsse. So blieb nur noch die Frage nach den Konsequenzen dieser Annahme. Während Everett als Erster die sich daraus ergebende quantenmechanische Verschränkung von mikroskopischem System, Messapparat und Beobachter ernst nahm, habe ich auch diejenige mit der jeweils unvermeidbaren »Umgebung« berücksichtigt und dies vor allem als Argument für die Notwendigkeit einer einzigen, universellen Wellenfunktion benutzt, die dann viele pseudoklassische »Welten« beschreibt.

Traditionell geht man davon aus, dass die Wellenfunktion nur eine beschränkte Bedeutung hat und etwa beim Klicken des Messzählers ihre weitere Berechtigung verliert. Das würde die bei der Messwechselwirkung entstehende Verschränkung immer wieder aufheben. Die Erweiterung der Quantentheorie auf die unkontrollierbare Umgebung eines jeden Systems macht dagegen die Verwendung klassischer Konzepte, etwa für Messapparate, überflüssig.

Diese erweiterte Anwendung der Quantentheorie ist inzwischen vielfach bestätigt worden. Sie erscheint offenbar noch allgemein akzeptabel, sofern man dazu die traditionelle Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion lediglich um einen Schritt verschiebt, sodass Letztere die Verschränkung mit der Umgebung einschließt. Damit ist aber nur wenig gewonnen! Geht man dagegen konsequenterweise noch einen Schritt weiter, indem man auch den Beobachter und den »Rest der Welt« in die quantenmechanische Beschreibung einbezieht, landet man bei der Everett-Interpretation, wonach die Quantensuperposition aller Messergebnisse weiterhin existieren muss.

Wegen dieser Konsequenz verschwanden meine frühen Arbeiten – soweit sie überhaupt publiziert wurden – zunächst ebenso in der Versenkung wie die Everetts. Erst als andere Autoren in den 1980er Jahren die Idee einer für alle makroskopischen Variablen wesentlichen Wechselwirkung mit der Umgebung aufgriffen, begann das Dekohärenz-Argument populär zu werden. Diese Popularität beruht aber leider nicht zuletzt auf einer verbreiteten Fehlinterpretation, die nicht zwischen Verschränkung und unvollständiger Information unterscheidet und dadurch die Konsequenz der Vielen Welten zu vermeiden scheint. Doch eine Interpretation der Wellenfunktion als reines Informationskonzept könnte niemals deren Konsequenzen für die Realität erklären – und bliebe selbst unerklärt.

Der Dekohärenz-Mechanismus beschreibt mittels der Schrödinger-Gleichung eine irreversible Delokalisierung von Superpositionen in Form einer globalen Verschränkung, sodass diese für einen lokalen Beobachter unzugänglich werden. Dadurch erhält die beim Messprozess auftretende »Verzweigung« der Wellenfunktion eine objektive Bedeutung – obwohl erst die dadurch bedingte Verzweigung der individuellen Beobachter verantwortlich für die Natur der von ihnen wahrgenommenen »Welt« ist.

H. Dieter Zeh

H. Dieter Zeh ist emeritierter Professor für Physik an der Universität Heidelberg. Sein Essay »Wozu braucht man ›Viele Welten‹ in der Quantentheorie?« ist im Internet unter **www.zeh-hd.de/VieleWelten.pdf** zu finden.

Ein Fenster zum heißen Universum

Das Weltraumteleskop Glast wird schon ab Mai einen nahezu unerforschten Teil des Gammahimmels ins Visier nehmen. Astronomen hoffen nun vor allem auf neue Erkenntnisse über Dunkle Materie und andere rätselhafte Phänomene einer neuen Physik.

Von William B. Atwood,
Peter F. Michelson und Steven Ritz

In Kürze

- **Das Gamma-ray Large Area Space Telescope** (Glast) wird schon ab Mai das Universum im Gammabereich untersuchen. Ebenso wie der sehnsüchtig erwartete Teilchenbeschleuniger LHC gilt Glast als »Entdeckungsmaschine«, die den Übergang zu einer neuen Ära der Physik markiert.
- Glast, das kurz vor dem Start noch öffentlichkeitswirksam umbenannt werden soll, schlägt gleich **zwei Fliegen mit einer Klappe**. Es untersucht einen bislang kaum erforschten Energiebereich am Gammastrahlungshimmel, registriert aber auch präzise die Ankunftszeiten von Gammapulsen. Dadurch lassen sich eine Reihe theoretischer Vorschläge zur Erweiterung des Standardmodells der Elementarteilchenphysik überprüfen.
- Mit vereinten Kräften könnten LHC und Glast das **Rätsel der Dunklen Materie lösen**, die den Hauptbestandteil der Masse in unserem Universum darstellt.

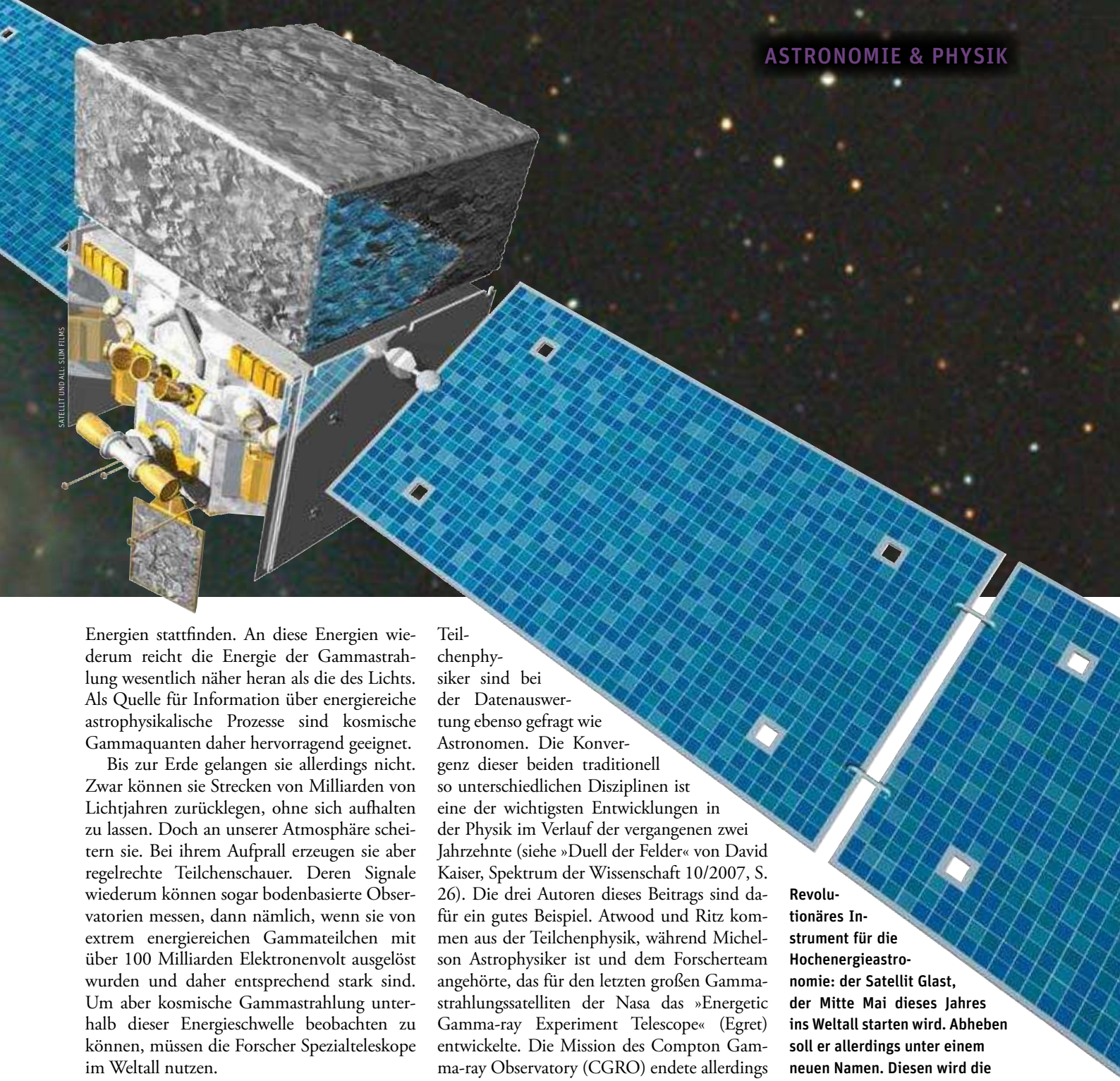
Schon in wenigen Wochen öffnen Wissenschaftler ein neues Fenster zum Universum. Im Mai nämlich startet die US-Weltraumbehörde Nasa ihr »Gamma-ray Large Area Space Telescope« (Glast). Mit diesem Gammastrahlungsteleskop werden Astronomen den rätselhaften Phänomenen in der Umgebung von supermassereichen Schwarzen Löchern und Neutronensternen auf den Grund gehen können. Doch Glast ist nicht die einzige neue »Entdeckungsmaschine«. Nur wenig später werden Teilchenphysiker mit Hilfe des Large Hadron Collider (LHC), der derzeit am europäischen Teilchenforschungszentrum Cern bei Genf in Betrieb genommen wird, die fundamentalen Bausteine der Natur und ihre Wechselwirkungen auf kleinsten Distanzen in den Blick nehmen – genauer, als es je zuvor möglich war (siehe »Ring der Erkenntnis« von Gerhard Samulat, Spektrum der Wissenschaft 9/2006, S. 80).

Das Schönste an dieser Doppelpremiere: Möglicherweise stoßen die Forscher bei beiden Experimenten auf dieselben mikroskopischen Phänomene. Glast wird sie in der Weite des Kosmos entdecken, während sie im LHC unter den künstlichen Bedingungen einer Beschleunigeranlage auftreten. Solche spannenden und geradezu revolutionären Zeiten erlebt die Wissenschaft nur selten.

Gammastrahlen liegen am energiereichsten Ende des elektromagnetischen Spektrums, sie verfügen über die höchsten Energien und daher die kürzesten Wellenlängen. Somit sind sie erheblich energiereicher als sichtbares Licht und selbst als Röntgenstrahlen. Gammaphotonen tragen so viel Energie, dass sich ein Teil davon gemäß Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ in Materieteilchen umwandeln kann.

Der Gammastrahlungshimmel gleicht dem gewohnten Himmel, den wir des Nachts über uns sehen, in fast nichts. Gleichwohl bietet er einen überraschend vielfältigen Anblick. Gammaaugen sähen statt der so friedlich wirkenden tintenschwarzen Kuppel einen brodelnden Kessel voller supermassereicher Schwarzer Löcher, die Materie mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ins Weltall schleudern, voller gewaltiger Sternexplosionen und ihrer schimmernden Überreste und voller superdichter Neutronensterne mit gigantischen Magnetfeldern. Sie sähen auch das Glühen der Galaxis, das sich geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung verdankt, die miteinander kollidieren. Und vielleicht sähen sie auch die Vernichtungsstrahlung bislang unbekannter Elementarteilchen, aus denen möglicherweise die geheimnisvolle Dunkle Materie besteht.

Schon 1958 hatte der inzwischen verstorbene Physiker Philip Morrison in einem einflussreichen Aufsatz die Möglichkeiten der Gammaastronomie vorausgesehen. Das vergleichsweise energiearme optische Licht einschließlich des Lichts der Sterne habe, so hieß es darin, schon verschiedene Wandlungsprozesse durchlaufen und weise nur noch indirekt auf seine ursprüngliche Quelle hin. Letztlich stamme es meist von nuklearen oder subnuklearen Vorgängen ab, die bei sehr viel höheren



SATELLIT UND ALL: SLIM FILMS

Revolutionäres Instrument für die Hochenergieastronomie: der Satellit Glast, der Mitte Mai dieses Jahres ins Weltall starten wird. Abheben soll er allerdings unter einem neuen Namen. Diesen wird die US-Weltraumbehörde Nasa bekannt geben, sobald sie Vorschläge aus aller Welt ausgewertet hat.

Energien stattfinden. An diese Energien wiederum reicht die Energie der Gammastrahlung wesentlich näher heran als die des Lichts. Als Quelle für Information über energiereiche astrophysikalische Prozesse sind kosmische Gammaquanten daher hervorragend geeignet.

Bis zur Erde gelangen sie allerdings nicht. Zwar können sie Strecken von Milliarden von Lichtjahren zurücklegen, ohne sich aufhalten zu lassen. Doch an unserer Atmosphäre scheitern sie. Bei ihrem Aufprall erzeugen sie aber regelrechte Teilchenschauer. Deren Signale wiederum können sogar bodenbasierte Observatorien messen, dann nämlich, wenn sie von extrem energiereichen Gammateilchen mit über 100 Milliarden Elektronenvolt ausgelöst wurden und daher entsprechend stark sind. Um aber kosmische Gammastrahlung unterhalb dieser Energieschwelle beobachten zu können, müssen die Forscher Spezialteleskope im Weltall nutzen.

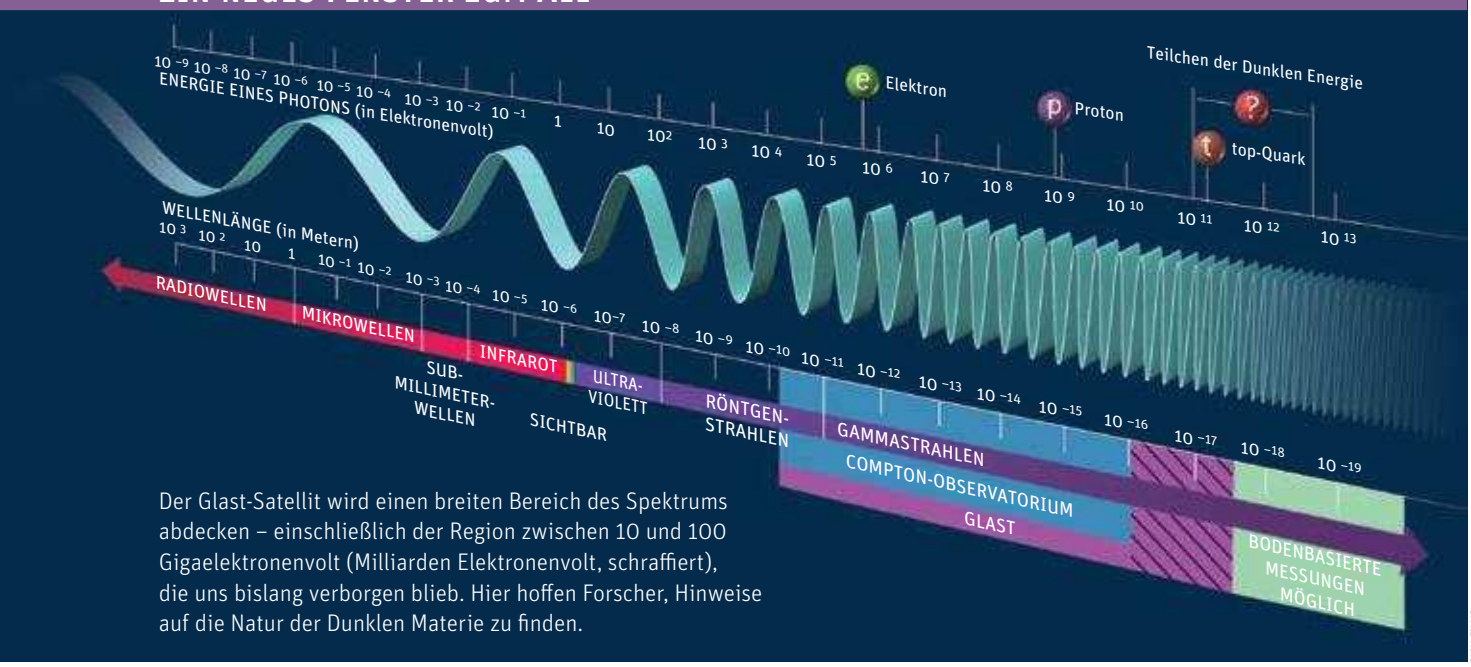
Im Erfolgsfall winkt reiche Belohnung

Doch auch das ist nicht einfach, denn die Vielfalt am Gammahimmel ist durchaus verwirrend: Was für den einen die gesuchten Signale sind, ist für den anderen unerwünschtes Hintergrundrauschen. Bei ihrer Jagd nach neuen Phänomenen werden die Wissenschaftler daher zunächst alle konventionellen astrophysikalischen Erklärungen für ihre Daten ausschließen müssen. Im Erfolgsfall winkt ihnen aber reiche Belohnung, denn Glasts Messungen sind derzeit wohl die einzigen, mittels derer wir einige grundlegende Fragen der Physik beantworten können.

Teilchenphysiker sind bei der Datenauswertung ebenso gefragt wie Astronomen. Die Konvergenz dieser beiden traditionell so unterschiedlichen Disziplinen ist eine der wichtigsten Entwicklungen in der Physik im Verlauf der vergangenen zwei Jahrzehnte (siehe »Duell der Felder« von David Kaiser, Spektrum der Wissenschaft 10/2007, S. 26). Die drei Autoren dieses Beitrags sind dafür ein gutes Beispiel. Atwood und Ritz kommen aus der Teilchenphysik, während Michelson Astrophysiker ist und dem Forscherteam angehörte, das für den letzten großen Gammastrahlungssatelliten der Nasa das »Energetic Gamma-ray Experiment Telescope« (Egret) entwickelte. Die Mission des Compton Gamma-ray Observatory (CGRO) endete allerdings bereits im Jahr 2000.

Die Idee für das Hauptinstrument des CGRO-Nachfahren Glast, das Large Area Telescope (LAT), entstand 1991 im Rahmen eines von Michelson abgehaltenen Seminars am kalifornischen Stanford Linear Accelerator Center (Slac). In der Folge kam es zum Gedankenaustausch zwischen Michelson, Atwood und Mitgliedern der kurz zuvor gegründeten und von Elliott Bloom geleiteten Slac-Arbeitsgruppe für Astroteilchenphysik, und schließlich entwickelte Atwood das grundlegende Design für das LAT. Er schlug vor, auf Silizium basierende Teilchendetektoren für die Anwendung in Gammastrahlungsteleskopen

Ein neues Fenster zum All



Der Glast-Satellit wird einen breiten Bereich des Spektrums abdecken – einschließlich der Region zwischen 10 und 100 Gigaelektronenvolt (Milliarden Elektronenvolt, schraffiert), die uns bislang verborgen blieb. Hier hoffen Forscher, Hinweise auf die Natur der Dunklen Materie zu finden.

SLIM FILMS

Glasts Hauptinstrument LAT wiegt drei Tonnen, verbraucht aber weniger Energie als ein Fön

anzupassen. Solche Instrumente waren ursprünglich für ein 1993 eingestelltes US-Teilchenbeschleunigerprojekt, den Superconducting Super Collider, entwickelt worden.

Ein weiteres Glast-Instrument entwickelten Charles Meegan und sein Team am Marshall Space Flight Center der Nasa. Ihr »Burst Monitor« sucht den Himmel nach solchen Strahlenausbrüchen ab, die in Energiebereichen unterhalb des Beobachtungsfensters des LAT stattfinden. Gemeinsam decken das Large Area Telescope und der Burst Monitor nun sieben Größenordnungen des elektromagnetischen Spektrums ab (siehe Bild oben).

Im Vergleich zu Egret wird das Large Area Telescope die hundertfache Menge an Gammastrahlung sammeln. Sein Gesichtsfeld entspricht ungefähr dem des menschlichen Auges, es überblickt also rund 20 Prozent des Himmels. Im Verlauf von zwei Umläufen um die Erde, also binnen rund drei Stunden, kann das Weltraumteleskop den gesamten Himmel erfassen. So wird es auch viele Quellen entdecken, die nur für kurze Zeit aufleuchten. Und schon nach wenigen Betriebstagen wird seine Empfindlichkeit höher sein als die, die Egret erst nach Jahren erreichte.

Dieser technologische Sprung wird uns tiefe Einsichten in die Physik supermassereicher Schwarzer Löcher und Neutronensterne liefern. Beide Objektarten erzeugen enorme Energiemengen im Gammastrahlenbereich. Während Egret an der Identifizierung von zwei Dritteln der von ihm entdeckten Gammaquellen noch scheiterte, verspricht Glast erheblich bessere Ergebnisse. Zudem wird der Satellit, an dessen Bau Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker aus den USA, aus Frankreich, Deutschland, Italien, Japan und Schweden beteiligt sind, das Standardmodell der Teilchenphysik unter extremen physikalischen Bedingungen überprüfen – und so vielleicht Hinweise auf Phänomene liefern, die über dieses Modell hinausweisen.

Dunkle Materie

Seit den 1930er Jahren wissen Astronomen, dass im Universum nicht nur sichtbare Materie existiert. Sowohl die Galaxien in Haufen als auch die Sterne in Galaxien bewegen sich schneller, als es die Anziehungskräfte, die von der für uns sichtbaren Materie ausgehen, erwarten lassen. Dies deutet auf einen großen Anteil an unsichtbarer Materie hin, die zusätzliche Anziehungskräfte ausübt. Inzwischen erkannten die Physiker, dass ein erweitertes Standardmodell genau diese Materie beschreiben könnte. Die populärste der Erweiterungen geht von einer noch hypothetischen Eigenschaft der Natur aus, der Supersymmetrie. Die Suche nach den von der Supersymmetrie vorhergesagten zusätzlichen Elementarteilchen ist wiederum eines der Hauptziele des LHC (siehe »Neue Physik jenseits des Standardmodells« von Gordon Kane, Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 26).

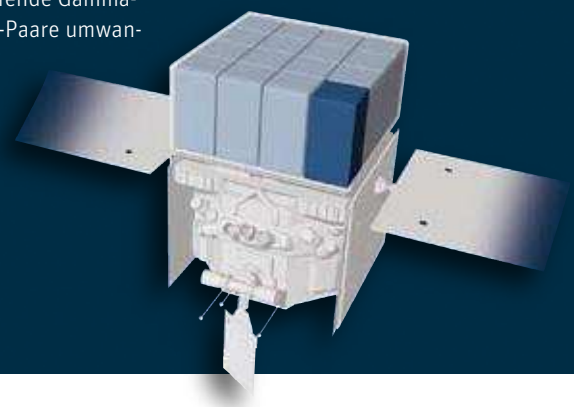
Die supersymmetrischen Teilchen sind jedoch nicht wirklich dunkel. Mit gewöhnlicher Materie und mit Licht tretenen sie zwar nur schwach in Wechselwirkung. Doch möglicherweise sind sie ihre eigenen Antiteilchen. Wann immer zwei dieser Teilchen aufeinandertreffen,

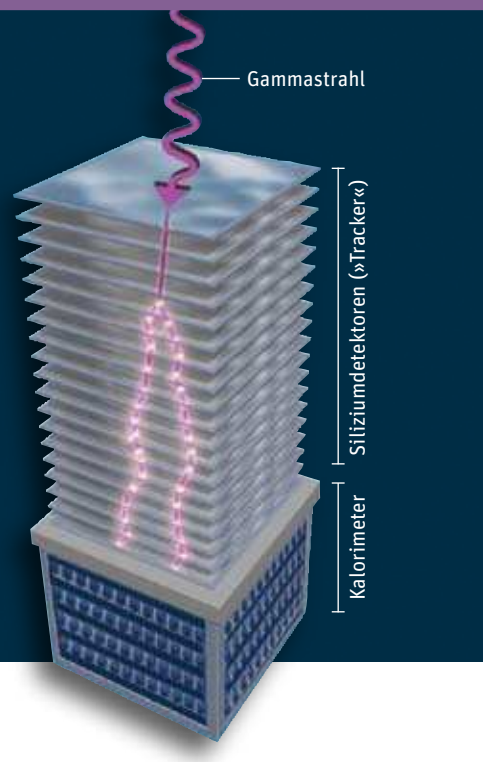
AUSGEDEHNTER FREQUENZBEREICH

Die beiden Instrumente des Satelliten decken einen Energiebereich ab, der sich über sieben Größenordnungen erstreckt. Auf ein Klavier übertragen, müsste dieses einen Tonumfang von 23 Oktaven besitzen.

Ein Teleskop ohne Linsen: das Large Area Telescope

Gammastrahlen sind zu energiereich, als dass sie sich von einem normalen Teleskop einfangen ließen. Ihr Nachweis erfordert Techniken, wie sie auch bei den Detektoren von Teilchenbeschleunigern zum Einsatz kommen. Im Hauptinstrument von Glast, dem LAT, befinden sich darum Schichten aus Wolfram, in denen sich eintreffende Gammaphotonen in Elektron-Positron-Paare umwandeln. Mittels Siliziumdetektoren lassen sich die Bahnen dieser Teilchen verfolgen und Informationen über die Richtung ermitteln, aus der die Gammastrahlung eintraf. Ein Kalorimeter am Ende des Instruments misst schließlich die Energie der Teilchen – und damit auch die der Gammastrahlen.





SLIM FILMS

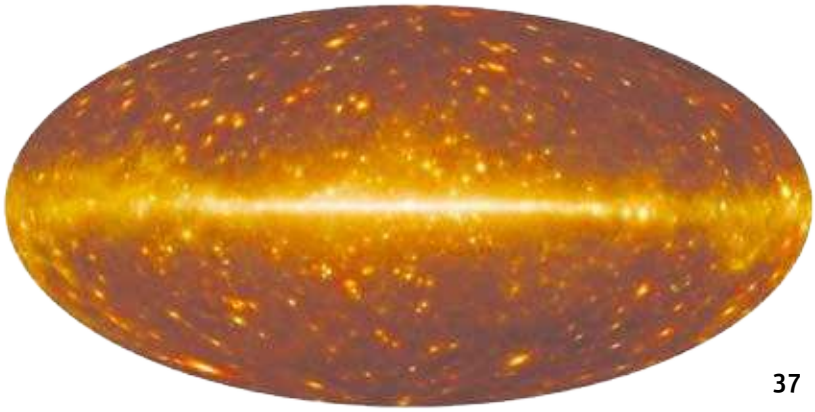
würden sie sich also gegenseitig vernichten. Ihre große Masse würde dabei in andere energiereiche Teilchen umgewandelt, unter anderem in Gammaphotonen. Die knifflige Aufgabe der Physiker wird bald darin bestehen, diese Strahlung von ähnlichen Emissionen anderer Quellen zu unterscheiden. Da unser Wissen über die Dunkle Materie aber sehr gering ist, unterscheiden sich die Abschätzungen über die Energie der von ihr ausgehenden Gammastrahlung bislang sehr stark.

Im einfachsten Fall entstehen bei der Paarvernichtung genau zwei Gammaphotonen. Deren Energie entspricht dann zusammengenommen gerade der Masse der beiden Teilchen der Dunklen Materie. Einige hundert Gigaelektronenvolt (GeV, Milliarden eV), so nimmt man derzeit an, beträgt die Masse eines solchen Teilchens. Die Situation ähnelt der Paarvernichtung von Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen. Dabei entstehen zwei Photonen mit jeweils 511 Kiloelektronenvolt (keV). Strahlung mit einer Energie von 511 keV ist für Astronomen ein eindeutiger Beleg dafür, dass Positronen an ihrer Entstehung beteiligt sein müssen. Entsprechend gilt auch: Wenn die Forscher auf einen Überschuss an Gammastrahlung im 100-GeV-Bereich stoßen, könnten sie sicher sein, dass Dunkle Materie eine Rolle bei ihrer Erzeugung spielt.

Leider aber ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, dass ein solches Signal stark genug wäre, um überhaupt beobachtbar zu sein. Die Energie der Prozesse, die beim Zerfall von Dunkler Materie auftreten, ist nämlich über einen großen Bereich verteilt. Unglücklicherweise würde sich das Signal zudem genau in jenem Energiebereich befinden, in dem auch – und zwar sehr viel häufiger – Gammastrahlung aus einer anderen Quelle auftritt: nämlich die, die bei der Kollision von Teilchen der kosmischen Strahlung mit interstellarem Gas und mit Strahlungsfeldern entsteht. Der Versuch, in diesem Bereich das Signal der Dunklen Materie aufzuspüren, ähnelt dem, inmitten einer hell erleuchteten Fußgängerzone den Sternhimmel zu beobachten. Glücklicherweise aber besitzt die Gammastrahlung der Dunklen Materie ein charakteristisches Spektrum. Zudem sollte auch ihre Verteilung am Himmel ein bestimmtes Muster aufweisen. So werden zum Beispiel nahe den Galaxienzentren auffällige Maxima zu sehen sein.

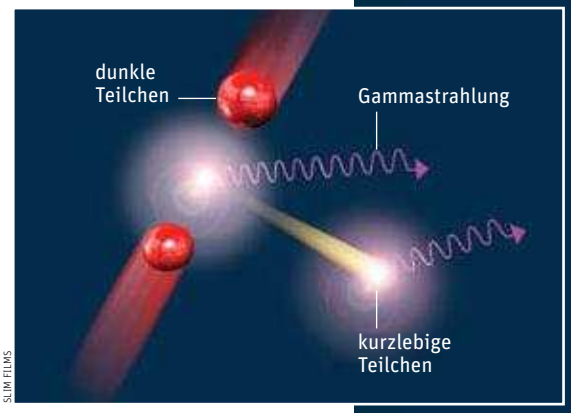
Die Daten von Glast und LHC werden sich hervorragend ergänzen. Findet der LHC neuartige Partikel, lassen sich deren Masse und Wechselwirkungen mit anderen Teilchen untersuchen. Einige von ihnen werden sich so als Kandidaten für die Dunkle Materie erweisen. Weil die neuen Teilchen aber viel zu schnell

So wird Glast den Himmel sehen (unten). In der Mitte dieser Projektion der gesamten Himmelssphäre (die Daten entstammen einer Computersimulation) befindet sich das galaktische Zentrum. Der helle horizontale Streifen ist die Scheibe der Milchstraße. Die von hier ausgehende Gammastrahlung stammt vor allem von kosmischer Strahlung, die mit Molekülen des interstellaren Gases kollidiert. Die meisten der hellen Punkte – es gibt einige tausend davon – sind supermassereiche Schwarze Löcher in den Kernen ferner Galaxien.



NASA, GLAST LAT TEAM

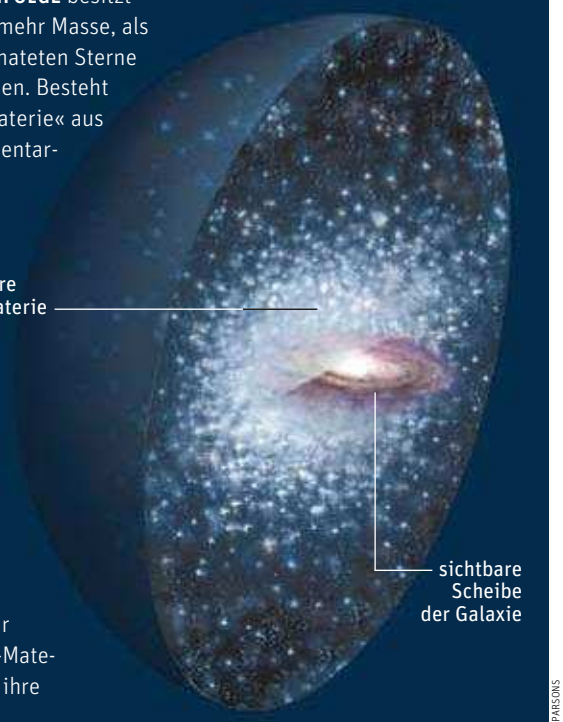
Verrät sich dunkle Materie durch Gammastrahlung?



SLIM FILMS

2 Wie finden wir diese Teilchen? Theoretische Überlegungen deuten darauf hin, dass sich die Teilchen der Dunklen Materie gegenseitig vernichten und dabei Gammastrahlung mit einer bestimmten Energie erzeugen können. Möglicherweise entstehen zunächst auch kurzlebige Elementarteilchen, die ihrerseits in Gammastrahlen unterschiedlicher Energien zerfallen.

1 Beobachtungen von Sternbewegungen zufolge besitzt die Galaxis viel mehr Masse, als die in ihr beheimateten Sterne aufbringen können. Besteht die »fehlende Materie« aus neuartigen Elementarteilchen?



LOGAN PARSONS

3 Entdeckt Glast die erwartete Gammastrahlung, würde dies nicht nur die Existenz der Dunklen Materie bestätigen (und damit alternative Theorien widerlegen). Dann könnten wir auch einige Eigenschaften der Dunklen-Materie-Teilchen ermitteln wie zum Beispiel ihre Masse und ihre Wechselwirkungen.

aus dem Beschleuniger entkommen, als dass sich ihre Lebensdauer messen ließe, sind die Glast-Daten unentbehrlich. Erst mit ihrer Hilfe lässt sich feststellen, ob sie überhaupt langlebig genug sind, um als Dunkle Materie in Frage zu kommen. Nur Glast kann also aufklären, welche Rolle diese Teilchen im Universum spielen. Darüber hinaus werden die Daten von Glast auch für weitere Experimente nützlich sein, nämlich für jene, die den Fluss Dunkler Materieteilchen durch unseren Planeten nachzuweisen versuchen (siehe »Die Suche nach Dunkler Materie« von David B. Cline, Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 44).

Schwarze Minilöcher

Die Spezielle Relativitätstheorie und die Quantenmechanik sind die beiden theoretischen Säulen der modernen Physik und seit Langem eng miteinander verwoben. Doch noch immer gelingt es den Physikern nicht, auch die Allgemeine Relativitätstheorie und damit die Gravitation in eine umfassende Theorie einzubeziehen. In den 1970er Jahren aber gelangten Stephen Hawking von der Universität Cambridge und seine Kollegen zu einer bemerkenswerten Voraussage. Die Effekte von Gravitationskräften einerseits und Quantenfluktuationen der Energie andererseits müssten zur Folge haben, dass Schwarze Löcher instabil sind. Demzufolge strahlen diese Objekte Teilchen ab – mit Energien, die umso größer würden, je stärker das Schwarze Loch schrumpft. Dieser selbstverstärkende Effekt würde schließlich mit einer dramatischen Explosion enden (siehe »Schwarze Löcher im Labor« von Bernard J. Carr und Steven B. Giddings, Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 32).

Beobachtbar ist dieser Schrumpfungseffekt allerdings nicht, weil er zu langsam abläuft. Falls es aber bereits im frühen Universum zur Entstehung Schwarzer Löcher kam (wozu anzumerken ist, dass viele Theoretiker diese Möglichkeit mit großer Skepsis beurteilen), dürften einige davon mittlerweile klein genug geworden sein, um nun zu explodieren. Denn Objekte mit einer Masse von rund einer Milliarde Kilogramm – die etwa der eines kleinen Asteroiden entspricht – haben vermutlich eine Lebensdauer von etwa 14 Milliarden Jahren, entsprechend dem Alter des Universums. Möglicherweise erlaubt uns Glast also, einen Prozess zu beobachten, in dem Quantenmechanik und Gravitation eine enge Verbindung eingehen.

Extradimensionen des Raums

Auch die Idee, unser dreidimensionales Universum könnte in einen Raum mit weiteren Dimensionen eingebettet sein, entstand bei den Bemühungen der Physiker, Relativitäts-

DAS LAT IN ZAHLEN

- **9500 Quadratzentimeter:** effektive Fläche, auf der Strahlung gesammelt wird
- **20 Prozent des Himmels:** Gesichtsfeld des Teleskops
- **20 MeV bis 300 GeV:** Energiebereich
- **10 Mikrosekunden:** Zeitauflösung
- **30 Millionen:** Voraussichtliche Zahl der pro Jahr registrierten Photonen

theorie und Quantenmechanik in einer einheitlichen Theorie zusammenzuführen. Einige Versionen dieser Theorien besagen, dass wir diese Extradimensionen nicht wahrnehmen, weil Materie und nichtgravitative Kräfte wie der Elektromagnetismus gewissermaßen in unseren dreidimensionalen Raum eingesperrt sind. Der Schwerkraft ist jedoch keine solche Beschränkung auferlegt: Gravitonen – die Trägerteilchen der Schwerkraft – könnten Verwandte besitzen, so genannte Kaluza-Klein-Gravitonen, die sich frei durch den höherdimensionalen Raum bewegen.

Sind diese Extradimensionen ausreichend groß, beeinflussen sie die Gravitation in einer Art und Weise, die sich mit Glast (und vielleicht auch dem LHC) nachweisen lassen könnte (siehe »Die unsichtbaren Dimensionen des Universums« von Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos und Georgi Dvali, Spektrum der Wissenschaft 10/2000, S. 44). Supernovae beispielsweise könnten einen Teil ihrer Explosionsenergie an solche fremdartigen Gravitonen abgeben. Diese wiederum würden dann in andere Teilchen zerfallen, insbesondere auch in Gammaphotonen. Nach solchen Effekten hielt schon Egret Ausschau, allerdings vergeblich. Daraus konnten die Physiker aber immerhin schließen, dass Supernovae höchstens ein Prozent ihrer Energie an Kaluza-Klein-Gravitonen abgeben. Weil Glast nun mit größerer Empfindlichkeit weit mehr Objekte dieser Art in Augenschein nehmen kann als Egret, bietet es die Chance, die Theorien über Extradimensionen genauer zu untersuchen. Zumindest aber wird es Forschern mit seiner Hilfe gelingen, einige ihrer Versionen zu widerlegen.

Verletzungen der Speziellen Relativität

Der Speziellen Relativitätstheorie zufolge ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum unabhängig von seiner Wellenlänge. Photonen hoher Energie (also kleiner Wellenlänge) sollten sich daher mit der gleichen Geschwindigkeit wie Photonen niedriger Energie (und großer Wellenlänge) bewegen. In diesem Phänomen manifestiert sich die Lorentz-Invarianz, also die mathematische Beschreibung des Einstein'schen Prinzips, dass die Gesetze der Physik für alle Beobachter gleich sein müssen, die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegen.

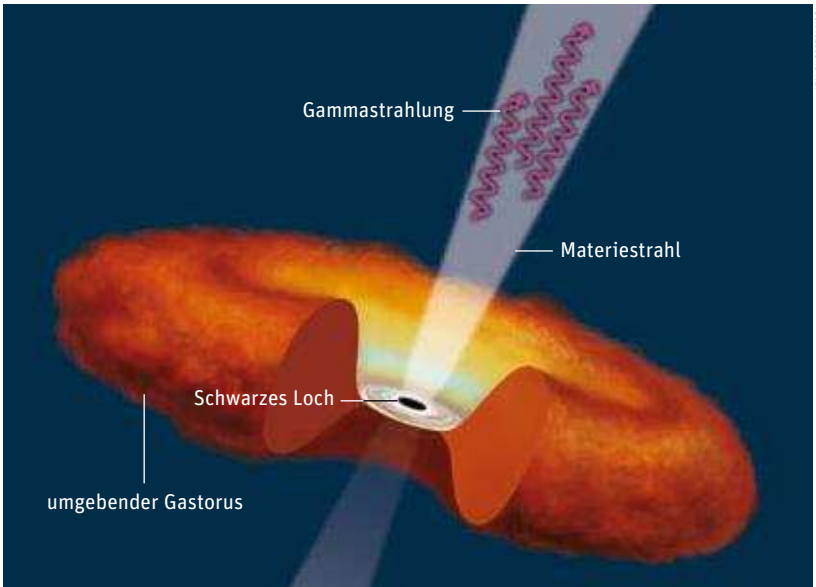
Aber gilt dieses Prinzip tatsächlich? In einer Quantentheorie der Gravitation vielleicht nicht. Auf kleinen Skalen könnte die Struktur der Raumzeit fluktuieren. Auf solche Störungen würden energiereiche Photonen empfindlicher reagieren als Photonen geringerer Energie – ähnlich wie ein Kinderroller die Unebenheiten des Straßenbelags stärker »spürt« als ein Lkw mit seinen großen Rädern. Durchqueren energiereiche Photonen die Unebenheiten der fluktuierenden Raumzeit, legen sie möglicherweise einen längeren oder kürzeren Weg als Exemplare mit niedrigerer Energie zurück (siehe »The Search for Relativity Violations« von Alan Kostelecký, Scientific American 9/2004, S. 74). Um solche kleinen Unterschiede aufzuspüren, führt man am besten ein Wettrennen über eine möglichst große Strecke durch, weil dann die zeitliche Differenz im Ziel am größten ist. Glücklicherweise betätigt sich der Kosmos hierbei als Organisator, denn jeder Gammastrahlenausbruch ist der Startschuss für ein solches Wettrennen. Dabei werden Photonen in einem großen Energiebereich frei, die unter Umständen Milliarden von Lichtjahren zurücklegen, bis sie bei uns eintreffen.

Egret entdeckte in seinem Gesichtsfeld gerade einmal sechs Gammaausbrüche – und von jedem von ihnen nur eine Hand voll Photonen. Glast wird sicherlich viel mehr davon aufspüren (in vielen verschiedenen Entfernungen) und kann dann nach Unterschieden in den Ankunftszeiten energiereicher und energiearmer Photonen suchen. Einige Modelle sagen Differenzen von zehn Millisekunden und mehr voraus. Sobald der Satellit auf eine solche Differenz stößt, müssen die Physiker aber zunächst alle alternativen astrophysikalischen Erklärungsmöglichkeiten ausschließen, zum Beispiel Effekte in dem explodierenden Stern selbst. Einer ihrer Tests wird darin bestehen, die gemessene Zeitdifferenz mit der Entfernung der jeweiligen Quelle in Beziehung zu setzen. Nimmt die Zeitdifferenz mit der Entfernung zu, sind an den meisten konventionellen Erklärungsansätzen bereits Zweifel erlaubt. Als weiterer Prüfstein gilt der Test, ob Gammastrahlen, deren Ursprung kein Gammaausbruch ist, sondern die Umgebung eines supermassereichen Schwarzen Lochs, dieselbe Zeitdifferenz aufweisen.

DUNKLE MATERIE IN REICHWEITE?

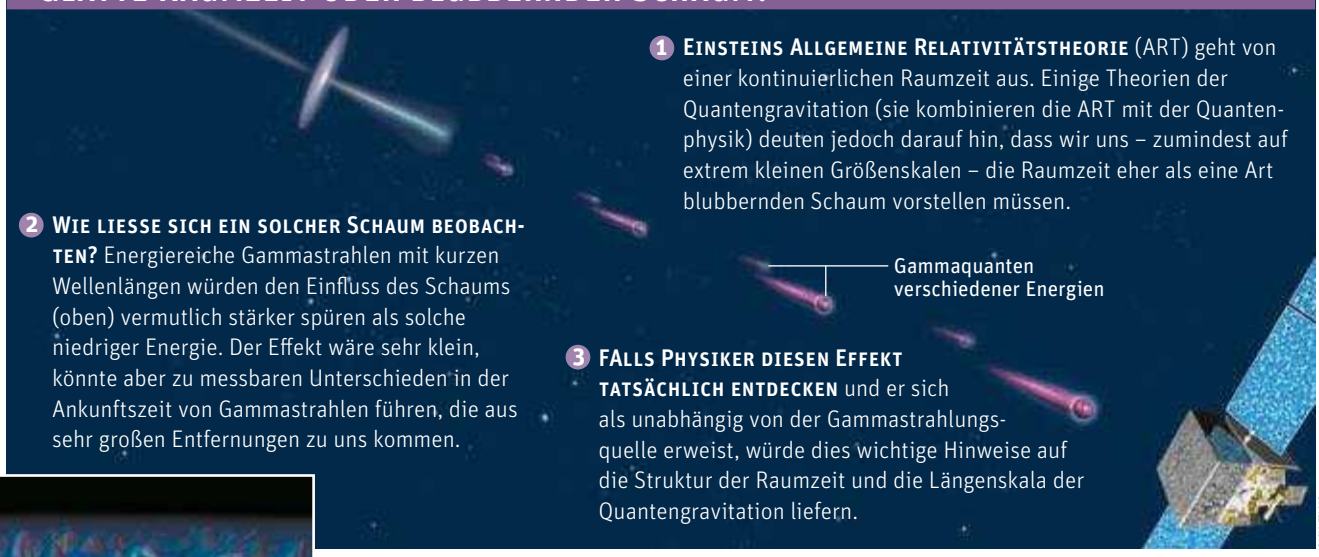
Sie ist **nicht nur weit draußen im Weltall** anzutreffen, glauben Forscher, sondern auch rings um uns herum. Bodengebundene Experimente wie CDMS (Cryogenic Dark Matter Search) im US-Bundesstaat Minnesota oder das italienische Cresst konnten sie allerdings noch nicht nachweisen – vermutlich wegen ihrer sehr schwachen Wechselwirkung.

Supermassereiche Schwarze Löcher zählen zu den außerhalb der Milchstraße liegenden Gammastrahlungsquellen. Die Glast-Forscher werden sich vor allem auch auf deren Materiestrahlen (»Jets«) aus energiereichen Teilchen konzentrieren, die eine Fülle von Gammastrahlung erzeugen. So können sie herausfinden, wie sich Materie unter extremen Bedingungen verhält.



JEN CHRISTIANSEN

Glatte Raumzeit oder blubbernder Schaum?



SLIM FILMS

1 Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie (ART) geht von einer kontinuierlichen Raumzeit aus. Einige Theorien der Quantengravitation (sie kombinieren die ART mit der Quantenphysik) deuten jedoch darauf hin, dass wir uns – zumindest auf extrem kleinen Größenskalen – die Raumzeit eher als eine Art blubbernden Schaum vorstellen müssen.

2 Wie liesse sich ein solcher Schaum beobachten? Energiereiche Gammastrahlen mit kurzen Wellenlängen würden den Einfluss des Schaums (oben) vermutlich stärker spüren als solche niedriger Energie. Der Effekt wäre sehr klein, könnte aber zu messbaren Unterschieden in der Ankunftszeit von Gammastrahlen führen, die aus sehr großen Entfernungen zu uns kommen.

3 Falls Physiker diesen Effekt tatsächlich entdecken und er sich als unabhängig von der Gammastrahlungsquelle erweist, würde dies wichtige Hinweise auf die Struktur der Raumzeit und die Längenskala der Quantengravitation liefern.

ALFRED T. KAMAJIAN

Materie unter extremen Bedingungen

Die bislang beschriebenen Phänomene ließen sich nur mit neuen physikalischen Gesetzen erklären. Doch auch manche der bestehenden Gesetze werfen noch viele Fragen auf – und Glast könnte einige davon beantworten. Supermassereiche Schwarze Löcher beispielsweise sind häufig in den Zentren von Galaxien zu finden und spielen eine wichtige Rolle in der Entwicklungsgeschichte dieser Sternsysteme. Sie wachsen, indem sie umgebendes Gas an sich binden. Dieses Wachstum kann so stark werden, dass das Innere der jeweiligen Galaxie eines Tages hell aufleuchtet und sich in einen »aktiven galaktischen Kern« (AGK) verwandelt (siehe »Hell wie tausend Galaxien« von Suzy Collin, Spektrum der Wissenschaft 1/2008, S. 34). AGKs wiederum zählen zu den Hauptquellen kosmischer Gammastrahlung.

Gammastrahlung wird dabei aber nur auf indirektem Weg produziert. Schwarze Löcher erzeugen gewaltige Materiestrahlen (»Jets«) aus energiereichen Teilchen, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Diese Jets bilden sich entlang der Drehachse der Schwarzen Löcher und beziehen ihre Energie aus deren Rotation. Stoßen Teilchen im Jet mit energieärmeren Photonen zusammen, katapultieren sie diese in den Gammabereich hinein. Allein in der Gammastrahlung, die bei diesem Prozess frei wird, kann so viel Energie stecken wie in der Strahlung, die alle Sterne unserer Milchstraße zusammengenommen über das ganze Spektrum hinweg abstrahlen.

Die Gammastrahlung extrem massereicher Schwarzer Löcher bietet Forschern also eine einzigartige Möglichkeit, die extremen Bedingungen in deren Nähe kennen zu lernen. Warum bleiben die Materiestrahlen über Strecken von Tausenden von Lichtjahren so stark gebündelt? Wo und wie verwandelt sich die Bewegungsenergie der Jets in Gammastrahlung? Im Verbund mit optischen und mit Radioobservatorien wird Glast die zeitlichen Veränderungen in den Spektren dieser gewaltigen Gammaquellen ermitteln und uns so vielleicht zu Antworten verhelfen.

Auch rotierende Neutronensterne faszinieren die Forscher. Einige von ihnen besitzen Magnetfelder, die zu den stärksten gehören, die im Universum vorkommen. Sie vermögen geladene Teilchen auf Energien zu beschleunigen, die selbst die Möglichkeiten des LHC weit übertreffen (siehe »Magnetare« von Chryssa Kouveliotou et al., Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 56). Ungewöhnliche Teilchenreaktionen, wie sie nahe ihrer Oberfläche stattfinden, können wir anhand der dabei entstehenden Gammastrahlung ebenfalls untersuchen. Während der Compton-Satellit die Gammastrahlung von sechs jungen Neutronensternen in unserer Milchstraße nachwies, lassen unsere derzeit besten theoretischen Modelle hoffen, dass Glast etwa zehnmal so viele aufspürt.

Zu den größten astrophysikalischen Rätseln der letzten Jahrzehnte zählen Gammastrahlenausbrüche: sehr kurze Blitze energiereicher Strahlung, die schnell wieder für immer verblassen (siehe »Die stärksten Explosionen im Universum« von Neil Gehrels et al., Spektrum der Wissenschaft 3/2003, S. 48). Wir können sie gleichmäßig über den Himmel verteilt entdecken, aber wo genau entstehen sie? Nach großen wissenschaftlichen Fortschritten in den letzten Jahren diskutieren die Astronomen heute zwei mögliche Ursachen für die Gammablitze. Sie scheinen entweder die Geburt Schwarzer Löcher in den Kernen sterbender massereicher Sterne zu begleiten oder sie rüh-

Literatur

Schwarze Materie. Von Lawrence M. Krauss. Insel, 2002

The first Glast symposium proceedings. Von Steven Ritz, Peter Michelson et al. (Hg.) in: AIP Conference Proceedings, Bd. 921, 2007

Dark cosmos: In search of our universe's missing mass and energy. Von Dan Hooper. HarperCollins, 2006

The edge of infinity: Supermassive black holes in the universe. Von Fulvio Melia. Cambridge University Press, 2003

Very high energy gamma-ray astronomy. Von Trevor C. Weekes. Taylor and Francis, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/943417.

ren von der Verschmelzung von Doppelsystemen her, die entweder aus Neutronensternen oder aus Schwarzen Löchern bestehen. Möglicherweise sind auch beide Szenarien richtig und beschreiben je unterschiedliche Arten von Gammaausbrüchen. Glast ist auf einzigartige Weise geeignet, dieses Geheimnis zu lüften.

Auch bei einer weniger spektakulären, aber gleichwohl wichtigen Frage könnte Glast weiterhelfen. Bei niedrigen Energien durchdringen sich zwei Lichtstrahlen einfach gegenseitig, ohne weiter Notiz voneinander zu nehmen. Bei hohen Energien hingegen kommt es durch Quanteneffekte zu einem außerordentlichen Phänomen: Licht kann mit Licht wechselwirken. So können zum Beispiel Gammaquanten mit Photonen von Sternen interagieren und dabei Elektron-Positron-Paare erzeugen. Die optische Strahlung im Universum wirkt also wie ein »Schleier«, den die Gammaquanten passieren müssen und in dem sie sich verfangen können – für besonders energiereiche Exemplare, die große Strecken zurücklegen, ist der Kosmos also nicht transparent. Indem Astrophysiker mit Glast die Gammaspektren zahlreicher aktiver Galaxien vermessen, können sie daher bestimmen, welche Menge an optischer und ultravioletter Strahlung das Weltall durchquert (oder zumindest Grenzwerte dafür ermitteln). Das Ergebnis verspricht wiederum Auskunft auf eine weitere Frage: nämlich auf die, wie sich die Rate der Sternentstehung im Kosmos im Lauf der Jahrmilliarden veränderte (siehe »Alles Licht der Welt« von Günther Hasinger und Roberto Gilli, Spektrum der Wissenschaft 5/2002, S. 22).

Das Unerwartete

Neue Messinstrumente mit stark verbesserter Leistung führten in der Geschichte der Naturwissenschaften schon oft zu unerwarteten Entdeckungen. Nur ein Beispiel: Das Compton-Observatorium stieß im Jahr 1994 auf ein sehr seltsames Phänomen. 75 Minuten nach dem Beginn eines Gammaausbruchs detektierte es ein einzelnes Gammaphoton mit der gewaltigen Energie von 18 GeV – das energiereichste Photon aus einem Gammastrahlenausbruch, das je vermessen wurde. Seither spekulieren die Theoretiker darüber, was wir daraus über die Physik der »Bursts« lernen können. Doch schon die bisherigen Generationen von Gammateleskopen haben uns jeweils ein großes Stück vorwärtsgebracht und Glast wird ebenfalls viele Fragen über das hochenergetische Universum beantworten. Rechnen müssen wir aber auch mit dem Unbekannten – und noch weiß niemand, was wir tatsächlich entdecken werden, wenn wir endlich durch das von Glast geöffnete Fenster blicken. ◁

NASA

Drei Männer in Weiß: die Autoren bei der Arbeit an den Instrumenten für das Glast-Teleskop

William B. Atwood (oben), Peter F. Michelson (links) und Steven Ritz sind Mitglieder des internationalen Glast-Teams. Atwood, derzeit außerplanmäßiger Professor an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz, war an zahlreichen Experimenten zur Teilchenphysik beteiligt, unter anderem jenem am Linearbeschleuniger des SLAC im kalifornischen Stanford, bei dem die Quarks entdeckt wurden. Außerdem ist er ein anerkannter Geigenbauer. Michelson ist Professor an der Universität Stanford und Chefwissenschaftler des Large Area Telescope von Glast. Er untersuchte zunächst Phänomene der Supraleitung und entwickelte Instrumente zum Nachweis von Gravitationswellen, bevor er sich der Astrophysik zuwandte. Ritz, Astrophysiker am Goddard Space Flight Center der Nasa und außerplanmäßiger Professor an der Universität Maryland, ist Projektwissenschaftler der Glast-Mission und komponiert in seiner Freizeit.

wichtige**online**adressen

Brainlogs
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

Hadronics
Neue Lösungen für das Massenproblem der Teilchenphysik
www.hadronics.de

Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

KOSMOpod
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

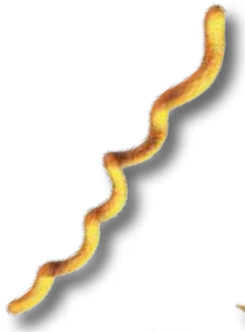
Portraits, Interieurs, Landschaften, Figurativa u. a.
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska – Kunstmalerin –
www.kwasniewska.com

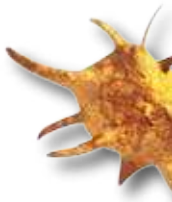
Platinnetz
das Netzwerk für die Generation der Junggebliebenen
www.platinnetz.de

WISSENSlogs
Science unplugged
www.wissenslogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de





ALIENS auf der Erde?

Sogar auf unserem Planeten könnte das Leben mehrmals entstanden sein. Forscher suchen nach Mikroorganismen, die sich grundlegend von der uns bekannten Lebensform unterscheiden.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

In Kürze

- Vielleicht entstand Leben auf der Erde nicht nur einmal, denn unter geeigneten Bedingungen kann dergleichen aus Sicht vieler Forscher recht leicht auftreten. Darum suchen Experten nun nach **exotischen Mikroorganismen** mit fremdartiger Biochemie.
- Ökologisch abgeschnittene Orte mögen sich für die Suche besonders gut eignen – etwa **heiße Quellen der Tiefsee** oder Trockentäler der Antarktis.
- Ausgeschlossen ist nicht einmal, dass um uns herum **fremdartiges Leben** existiert. Wissenschaftler müssten nach Kennzeichen einer ungewohnten Biochemie fahnden.

Von Paul Davies

Der Ursprung des Lebens gehört zu den großen Rätseln der Wissenschaft. Wie, wo oder wann es entstand, vermag niemand genau zu sagen. Die Forscher wissen kaum mehr, als dass vor ungefähr dreieinhalb Milliarden Jahren auf der Erde mikrobielles Leben etabliert war. Was davor geschah, lässt vor allem Raum für Spekulationen.

So glaubte vor dreißig Jahren die Mehrzahl der Biologen, das Leben hätte mit einem chemischen Zufall seinen Anfang genommen, einem Ereignis von so geringer Wahrscheinlichkeit, dass sich dergleichen im Universum kein zweites Mal zugetragen haben dürfte. Diese Haltung vertrat auch der französische Biochemiker und Nobelpreisträger Jacques Monod (1910–1976). Er schrieb 1970: »Der Mensch weiß endlich, dass er in der teilnahmslosen Unermesslichkeit des Universums allein ist, aus dem er zufällig hervortrat.«

Inzwischen herrscht eine völlig andere Auffassung vor. Vor gut zehn Jahren nannte der belgische Biochemiker und Nobelpreisträger Christian de Duve Leben eine »kosmische Zwangsläufigkeit«. Auf jedwedem erdähnlichen Planeten müsse es fast zwingend entstehen. Hiervon sahen sich Astrobiologen in ihrer Ansicht bestärkt, dass es im Universum sicherlich davon wimmele. Der amerikanische Chemiker Robert Shapiro spricht gar von einem biologischen Determinismus. Manchmal kleiden Forscher diese These in Worte wie: Leben sei bereits »in die Naturgesetze eingeschrieben«.

Nur, wie können Wissenschaftler feststellen, welche Auffassung zutrifft? Ein klarer Beleg wäre der Nachweis von unabhängigen Lebensspuren auf einem anderen Planeten, etwa auf dem Mars. Indizien dafür, dass Leben allein in unserem Sonnensystem an verschiedenen Orten eigenständig auftrat, dürften wohl bedeuten, dass die These vom biologischen Determinismus zutrifft. Leider kann es noch etwas dauern, bis Marsmissionen auf dem Roten Planeten nach extraterrestrischen Lebensformen fahnden und diese gegebenenfalls analysieren können.

Doch womöglich ließe sich der Nachweis solch eines biologischen Determinismus sogar einfacher führen. Kein Planet ist schließlich erdähnlicher als die Erde selbst. Wenn Leben unter terrestrischen Bedingungen wirklich so leicht entsteht, geschah das hier vielleicht öfter. Wissenschaftler fasziniert diese Idee so sehr, dass sie bereits in Wüsten, Seen, Höhlen nach Hinweisen auf fremdartige Lebensformen suchen – nach Organismen, die sich von allem Bekannten grundlegend unterscheiden. Diese exotischen Wesen wären höchstwahrscheinlich mikroskopisch klein. Vielleicht existieren solche Aliens sogar mitten unter uns. Um sie dingfest zu machen, entwickeln Forscher daher spezielle Tests.

Auf eine feste Definition von Leben konnten sich die Experten zwar bisher nicht einigen. Trotzdem wären die meisten Wissenschaftler damit einverstanden, dass folgende zwei Kriterien unabdingbar sind: Stoffwechsel und Fortpflanzung.

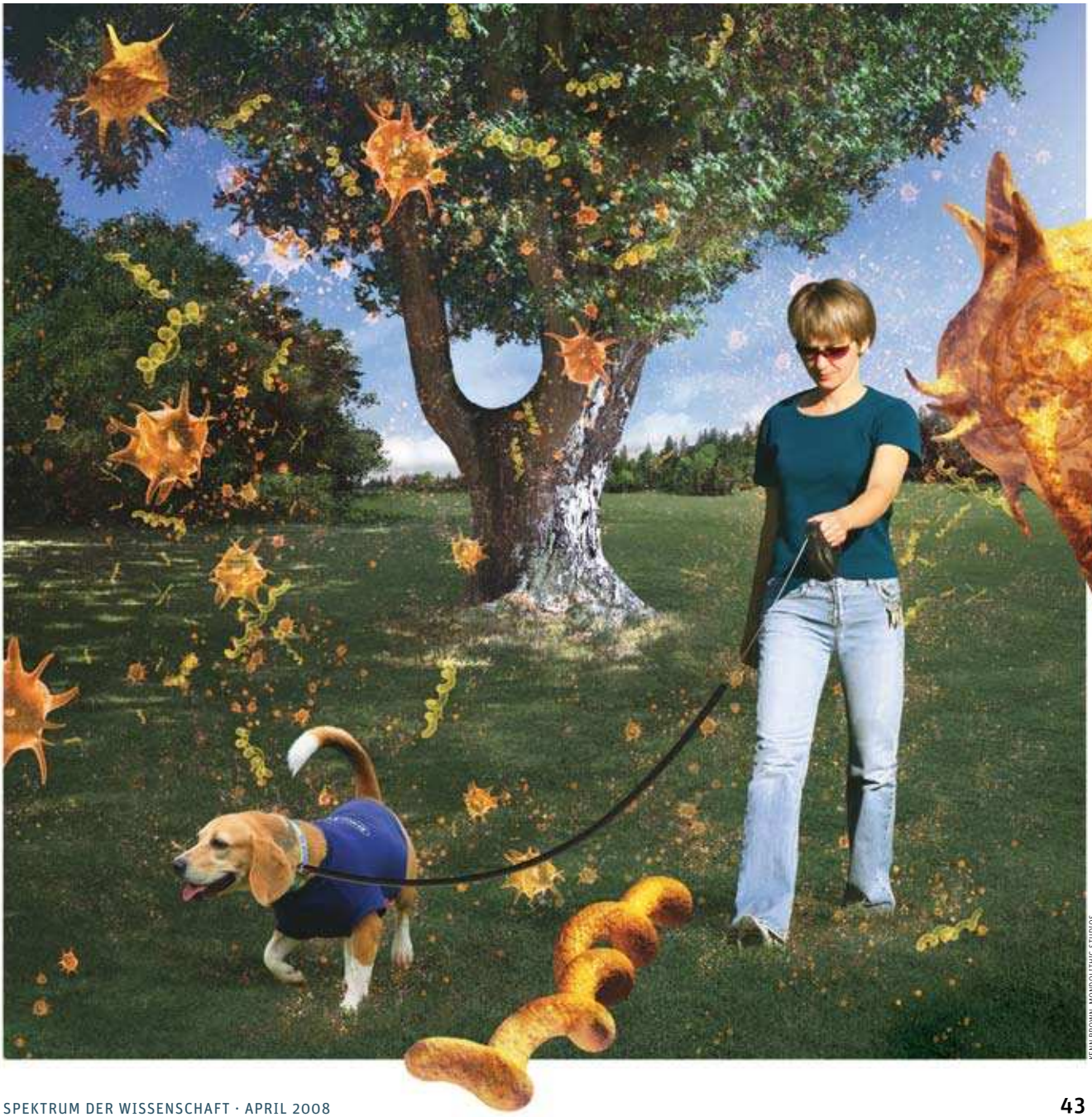
Vorausgesetzt, Leben hätte sich auf der Erde tatsächlich mehrfach gebildet, so müsste nach herkömmlicher Auffassung bald eine Sorte davon dominiert und die anderen eliminiert haben. Zum Beispiel könnte sich eine Lebensform schnell aller Ressourcen bemächtigt haben. Oder sie verstand sich Vorteile zu verschaffen, indem sie innerhalb der eigenen Sorte erfolgreiche – bewährte – Gene austauschte.

Doch solch ein Szenarium überzeugt nicht wirklich. Schließlich handelt es sich auch bei den Bakterien und den Archaea (Archaebak-

terien) um zwei grundverschiedene Typen von Mikroorganismen. Beide Gruppen gingen vor über drei Milliarden Jahren aus einem gemeinsamen Vorfahren hervor und konnten all die Zeit friedlich nebeneinander existieren, ohne dass ein Typ den anderen ausgelöscht hätte. Außerdem müssten fremdartige Lebensformen mit der uns vertrauten Sorte nicht unbedingt direkt um Ressourcen konkurriert haben. Möglicherweise beanspruchten die anderen Formen entweder gar nicht dieselben Orte, weil sie eine extremere Umwelt brauchten, wo unsere Art des Lebens es nicht aushielt. Oder die verschiedenen Formen lebten zwar nebeneinander, nutzten aber völlig andere Ressourcen.

Selbst wenn es dieses alternative irdische Leben heute nicht mehr geben sollte – in der fernen Vergangenheit könnte es immerhin gediehen sein, bis es dann aus irgendeinem Grund ausstarb. In dem Fall bestünde die Chance, davon noch Relikte zu entdecken. Hätte beispielsweise der Stoffwechsel anders funktioniert, dann fänden sich vielleicht Gesteinsmodifikationen oder mineralische Ablagerungen, die sich nicht auf bekannte Organismen zurückführen lassen. Uralte Mikrofossilien könnten sogar ungewöhnliche organische Moleküle enthalten, wie sie vertraute Lebensformen nie herstellen. Wer weiß, was in den vermuteten Mikrofossilien in über 2,5 Milliarden Jahre alten Gesteinen aus dem Archaikum so alles steckt?

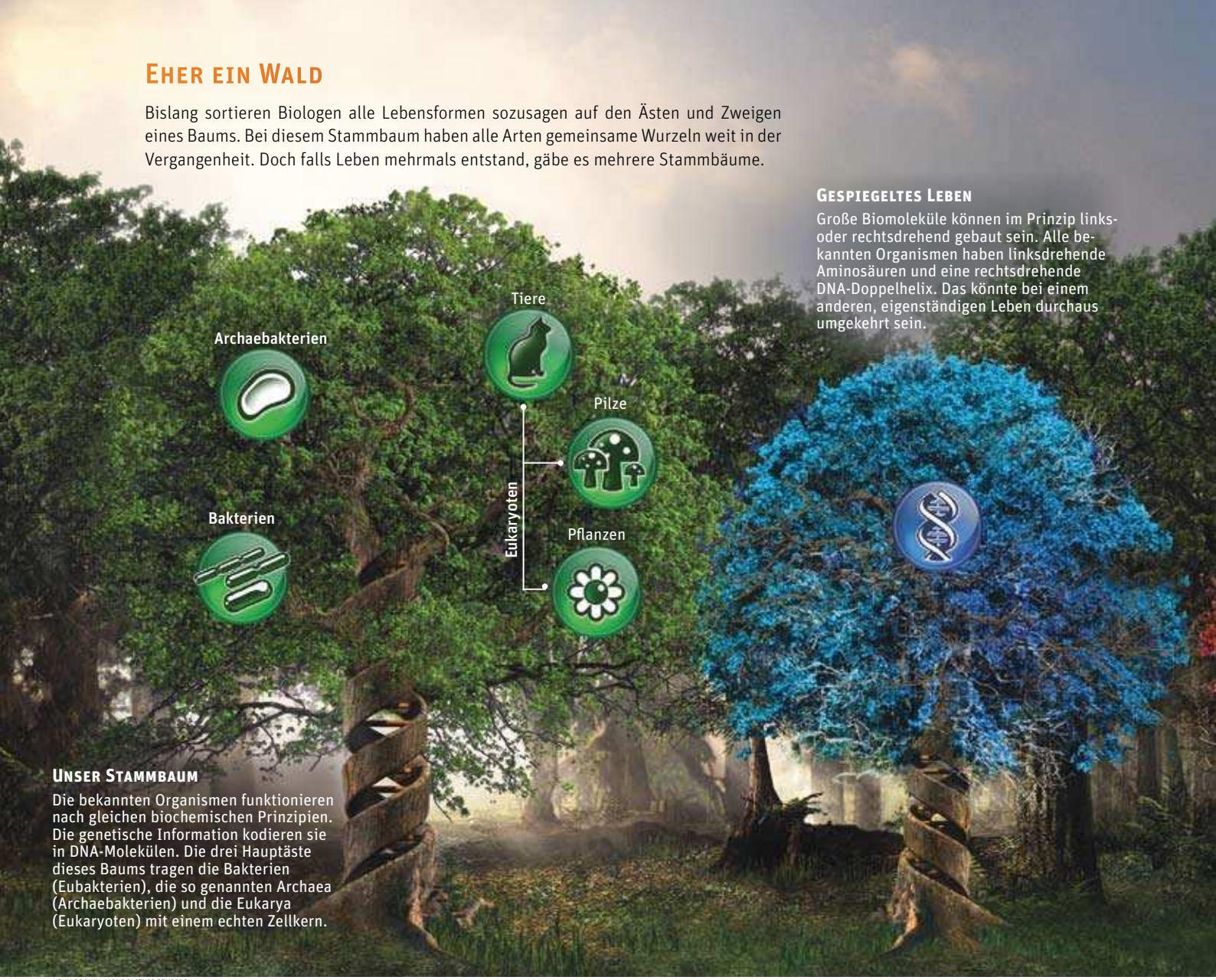
Überall um uns herum könnten fremdartige Mikroorganismen leben, die normalen Bakterien nur äußerlich ähneln.



KENN BROWN, MONOLITHIC STUDIOS

Eher ein Wald

Bislang sortieren Biologen alle Lebensformen sozusagen auf den Ästen und Zweigen eines Baums. Bei diesem Stammbaum haben alle Arten gemeinsame Wurzeln weit in der Vergangenheit. Doch falls Leben mehrmals entstand, gäbe es mehrere Stammbäume.



Gespiegeltes Leben

Große Biomoleküle können im Prinzip links- oder rechtsdrehend gebaut sein. Alle bekannten Organismen haben linksdrehende Aminosäuren und eine rechtsdrehende DNA-Doppelhelix. Das könnte bei einem anderen, eigenständigen Leben durchaus umgekehrt sein.

Unser Stammbaum

Die bekannten Organismen funktionieren nach gleichen biochemischen Prinzipien. Die genetische Information kodieren sie in DNA-Molekülen. Die drei Hauptäste dieses Baums tragen die Bakterien (Eubakterien), die so genannten Archaea (Archaebakterien) und die Eukarya (Eukaryoten) mit einem echten Zellkern.

KENN BROWN, MONDOLITHIC STUDIOS

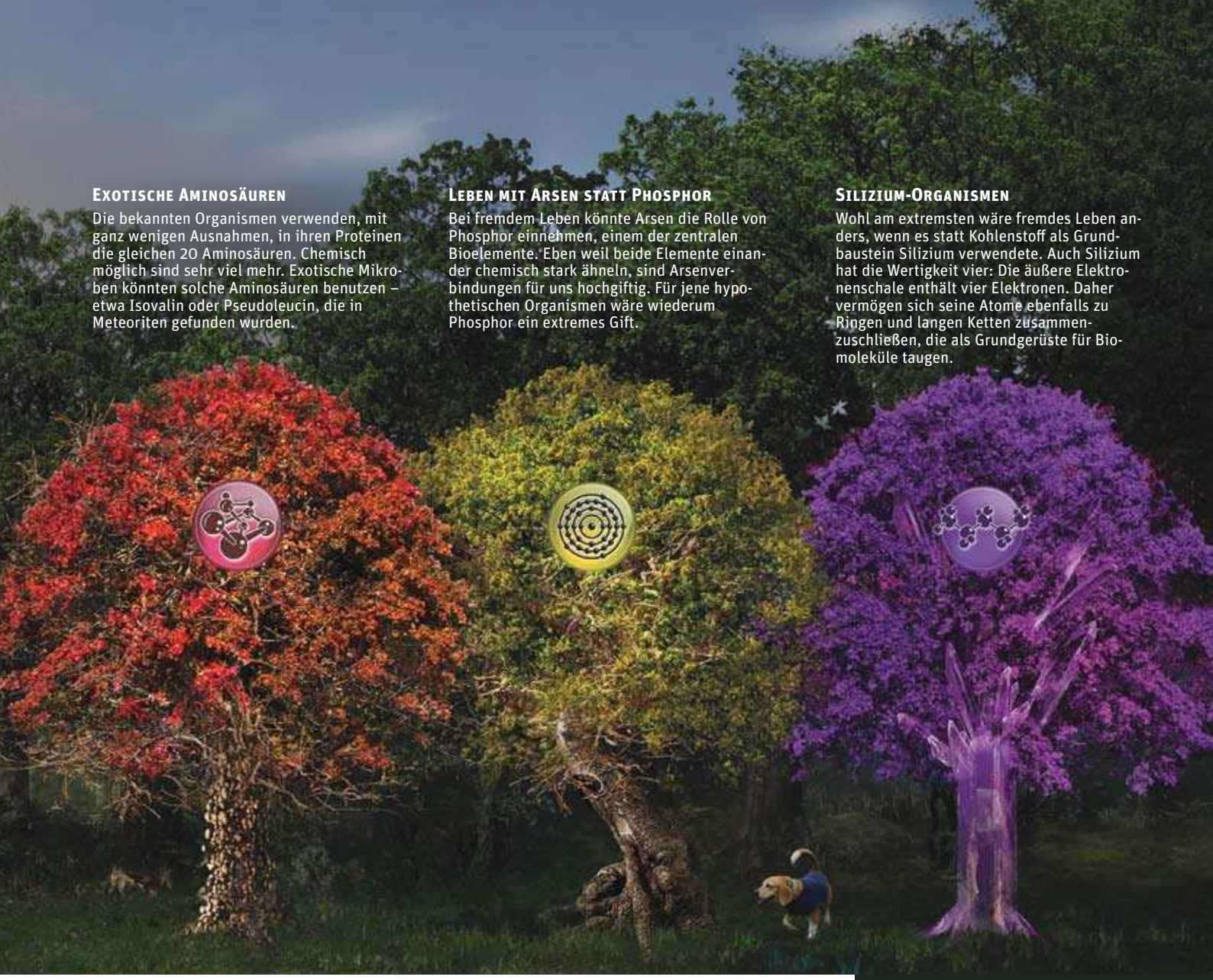
Noch aufregender, auch gewagter, ist die These, dass alternative Lebensformen bis heute überlebt haben. Carol Cleland und Shelley Copley von der Universität von Colorado in Boulder prägten dafür den Ausdruck Schattenbiosphäre. Die Idee mag zunächst völlig abwegig erscheinen. Wie sollten die Fremdlinge vor unserer Nase – oder sogar in unserer Nase? – bis heute unentdeckt geblieben sein? Nun, wieso eigentlich nicht? Schließlich sind bei Weitem die meisten Organismen auf der Erde Mikroben. Der Blick ins Mikroskop eröffnet kaum Aufschluss über deren spezielle Eigenheiten. Um zu erfahren, wohin jeder einzelne Winzling in dem Stammbaum gehört, den Phylogenetiker für alle bekannten Lebewesen erstellt haben, muss man meist erst Teile seines Erbguts sequenzieren – eine Mammutaufgabe. Nur einen kleinen Bruchteil der bisher gefundenen Mikroorganismen konnten die Forscher schon auf die Weise untersuchen. Fast mit Sicherheit haben Molekularbiologen noch keinen Organismus fremden Ursprungs auseinandergenommen. Denn alle so weit geprüften Lebewesen gleichen sich biochemisch. Auch der genetische Kode erweist sich bisher immer als fast derselbe. Eben deswegen können die Forscher ja deren Gene sequenzieren und dann im gemeinsamen Stammbaum verorten. Die bewährten Methoden zur Analyse neu entdeckter Organismen sind in voller Absicht darauf zugeschnitten, herkömmliches Leben zu erkennen. Für eine fremdartige Biochemie sind sie nicht gedacht. Darum mag uns ein Schattenleben in der Mikrobensphäre bisher durchaus entgangen sein.

Wo sollten Forscher auf der heutigen Erde nach solchen Aliens suchen? Manche Wissenschaftler fahnden nach Nischen, wo vertraute Organismenformen nicht leben können. Allerdings mussten die Biologen gerade in letzter Zeit immer wieder verblüfft erkennen, an welch extremen, uns völlig unwirtlich erscheinenden Orten exotische Vertreter

Kriterien von Leben

Zu Hauptkennzeichen würden wohl die meisten Naturwissenschaftler rechnen:

- Aufnahme von Stoffen aus der Umwelt
- Energiegewinnung aus Nährstoffen
- Abgabe von Abfallstoffen
- Fortpflanzung



Exotische Aminosäuren

Die bekannten Organismen verwenden, mit ganz wenigen Ausnahmen, in ihren Proteinen die gleichen 20 Aminosäuren. Chemisch möglich sind sehr viel mehr. Exotische Mikroben könnten solche Aminosäuren benutzen – etwa Isovalin oder Pseudoleucin, die in Meteoriten gefunden wurden.

Leben mit Arsen statt Phosphor

Bei fremdem Leben könnte Arsen die Rolle von Phosphor einnehmen, einem der zentralen Bioelemente. Eben weil beide Elemente einander chemisch stark ähneln, sind Arsenverbindungen für uns hochgiftig. Für jene hypothetischen Organismen wäre wiederum Phosphor ein extremes Gift.

Silizium-Organismen

Wohl am extremsten wäre fremdes Leben anders, wenn es statt Kohlenstoff als Grundbaustein Silizium verwendete. Auch Silizium hat die Wertigkeit vier: Die äußere Elektronenschale enthält vier Elektronen. Daher vermögen sich seine Atome ebenfalls zu Ringen und langen Ketten zusammenzuschließen, die als Grundgerüste für Biomoleküle taugen.

unserer eigenen Sorte Leben gedeihen. Manche Mikroben hausen in kochend heißen Vulkanschloten, andere in antarktischen Trockentälern, manche in gesättigten Salzseen, wieder andere in hochsauren, metallreichen Erzbergbauhalden, einige selbst in den radioaktiv verstrahlten Abklingbecken von Atomreaktoren.

Härtetest im Labor

Doch sogar diese so genannten Extremophilen stoßen an ihre Grenzen. Alles Leben der uns bekannten Biochemie benötigt flüssiges Wasser. So ist die Atacamawüste im Norden Chiles offenbar zu trocken – dort gibt es keinerlei Spuren vertrauten Lebens. Auch bei der Temperatur scheint eine Obergrenze zu existieren: Jenseits von etwa 130 Grad Celsius fanden Forscher keine Mikroben mehr. Dass alternative Lebensformen in noch trockeneren oder noch heißeren Umwelten gedeihen, wäre dagegen durchaus vorstellbar.

Stößt man in ökologisch isolierten Regionen auf Anzeichen biologischer Aktivität – wie ein Kohlenstoffzyklus zwischen Boden und Atmosphäre –, so könnte das auf fremdartige Erscheinungen hindeuten. Als Orte für abgeschiedene Ökosysteme kämen tiefe Schichten der Erdkruste in Frage, auch die obere Atmosphäre, die Antarktis, Salzbergwerke oder von Metallen oder anderen Schadstoffen verseuchte Plätze. Aber die Forscher könnten auch anders vorgehen und verdächtige Organismen im Labor harschen Bedingungen aussetzen. Kritische Parameter wie die Temperatur, Feuchtigkeit und dergleichen könnten sie so lange variieren, bis die bekannten Lebensformen sämtlich abgetötet wären. Sollte danach trotzdem noch biologische Aktivität auftreten, bestände vielleicht eine Chance, dass hier Schattenleben zugegen ist. Auf diese Weise entdeckten Wissenschaftler das strahlungsresistente Bakterium *Deinococcus radiodurans*. Es hält das Tausendfache an Gammastrahlung aus, bei der Men-

Leben ohne Wasser?

Flüssiges Wasser gilt bisher als eine Grundvoraussetzung für Leben. Doch einige Astrobiologen mutmaßen, dass auch andere Flüssigkeiten als Medium – als Lösungsmittel – für biochemische Reaktionen in Frage kommen könnten. Zwei Kandidaten sind Ethan und Methan. Bei großer Kälte, wie auf dem größten Saturnmond Titan, liegen diese Verbindungen flüssig vor.

Ein Schattenleben aus Mikroben, **integriert in die bekannte Biosphäre,** würde zufällig kaum entdeckt

schen sterben. Allerdings gehört diese Mikrobe ebenso wie alle anderen entdeckten so genannten Radiophilen dennoch genetisch zu unserer Lebensform.

Eine Hand voll Ökosysteme, die vom Rest der Biosphäre weit gehend isoliert erscheinen, haben Forscher schon prospektiert: Tief unter der Erdoberfläche existieren Mikrobengemeinschaften ohne Licht, Sauerstoff und organische Produkte anderer Organismen. Eine Lebensgrundlage für alle entsteht dadurch, dass manche von ihnen Kohlendioxid und Wasserstoff verwerten, die in ihrem Lebensraum durch chemische Reaktionen oder durch Radioaktivität freigesetzt werden. Soweit bisher untersucht, sind diese Unterweltbewohner mit oberirdischen Mikroben eng verwandt. Doch da diese Forschungen noch jung sind, könnten hier Überraschungen warten. Im Rahmen eines internationalen Bohrprogramms zur Erforschung der Tiefseeböden gewannen Forscher Gesteinsproben von bis zu einem Kilometer unter dem Meeresboden. Spuren biologischer Aktivität finden sich bei Landbohrungen sogar in noch größerer Tiefe. Doch bisher wird das Leben im Tiefengestein nicht in Großprojekten systematisch erforscht.

Man sollte denken, Aliens wären leichter aufzuspüren, wenn sie integriert in die bekannte Biosphäre praktisch unter uns lebten. Sofern das Schattenleben allerdings nur aus Mikroben bestünde, die inmitten von gewöhnlichen Mikroorganismen hausten, würden sie wohl kaum zufällig entdeckt. Denn rein äußerlich dürften sie nicht weiter auffallen. Die Mikrobenwelt besteht fast nur aus kugel- und stäbchenförmigen Wesen. Allein eine fremde Biochemie würde uns die andere Lebensform verraten. Hier könnten Forscher ansetzen. Sie müssten Annahmen darüber machen, was bei den Aliens chemisch anders sein könnte und welche Spuren das hinterließe. Nach solchen hypothetischen Charakteristika könnten sie dann gezielt fahnden.

Ein einfaches Beispiel wäre die Händigkeit oder Chiralität großer, asymmetrischer Biomoleküle. Im Prinzip könnten diese Moleküle rechts- oder linksdrehend gebaut sein. Doch alle bekannten Organismen verwenden stets

Wo sich Exoten verstecken könnten

Hausen fremdartige Organismen an Orten, die für die allermeisten bekannten Lebensformen höchst widrige Umwelten darstellen? Solche Nischen könnten der stark salzige Mono Lake in Kalifornien bieten (Bild links), die Trockentäler der Antarktis (oben) oder der kupferbelastete, normalem Leben feindliche Rio Tinto in Spanien (unten).

PETER ARNOLD INC. / ARCO, P. FRISCHKNECHT

NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION, MARIA STENZEL

CORBIS, ERIC AND DAVID HOSKING

nur eine – und alle die gleiche – spiegelbildliche Fassung. Das ist Voraussetzung, um komplexere Strukturen herstellen zu können. So sind die Aminosäuren (die Bausteine der Proteine) immer linksdrehend, Zucker rechtsdrehend, und auch die DNA-Doppelhelix ist rechtsgängig. Aber genauso gut hätte sich das alles zu Anfang des Lebens umgekehrt herausbilden können. Ein unabhängig entstandenes Schattenleben mag darum in allem spiegelbildlich zu unserem sein. Mit unserer Daseinsform würde es dann nicht unmittelbar konkurrieren. Beide wären auch nicht fähig, Gene miteinander auszutauschen, denn entscheidende Moleküle würden nicht zusammenpassen.

Passend für eine Spiegelwelt

Ein solchermaßen gespiegeltes Leben wäre nicht schwer zu finden. Die Forscher müssten einfach eine Nährlösung rein aus Biomolekülen mit verkehrter Händigkeit herstellen und sie mit Proben versetzen. Im Gegensatz zu normalen Organismen könnten Lebewesen aus dem Spiegelreich möglicherweise darin gedeihen. Richard Hoover und Elena Pikuta vom Marshall-Raumflugzentrum der Nasa haben das kürzlich versucht. In die Nährlösung gaben sie verschiedene neu entdeckte Extremophile. Tatsächlich vermehrte sich nun ein Mikroorganismus aus dem Sediment eines alkalischen kalifornischen Sees, der die Bezeichnung *Anaerovirgula multivorans* erhielt. Bei näherer Untersuchung entpuppte er sich jedoch als ein Bakterium der gewöhnlichen Welt, das sich allerdings verblüffenderweise darauf versteht, die verkehrten Aminosäuren und Zucker so umzubauen, dass er sie verwerten kann. Dennoch könnten Spiegelorganismen existieren, denn an der Studie nahm nur ein winziger Bruchteil der Mikrobenwelt teil.

Des Weiteren wäre eine Schattenbiosphäre vorstellbar, die biochemisch weit gehend so wie unsere funktioniert, aber einen anderen Satz Aminosäuren oder Nukleotide (DNA-Bausteine) benutzt. Alle bekannten Lebewesen speichern ihre genetische Information in Abfolgen der gleichen im Wesentlichen vier Nukleotide. Auch bauen sie ihre Proteine, sozusagen die Arbeiter der Zellen, mit seltenen Ausnahmen aus zwanzig bestimmten Aminosäuren. Beim genetischen Kode stehen jeweils drei Nukleotide für eine dieser Aminosäuren. Im Labor lassen sich aber noch viele andere Aminosäuren synthetisieren, die in den bekannten Organismen nicht vorkommen. Der Murchison-Meteorit, ein Kometenrest, der 1969 in Australien niederging, enthielt neben vielen vertrauten Aminosäuren auch einige außergewöhnliche, so Isovalin und Pseudoleucin. (Woher die Aminosäuren in dem Meteoriten kamen, ist ungewiss. Die Mehrheit der Forscher glaubt nicht, dass sie auf Bioaktivität zurückgehen.) Manche solcher exotischen Aminosäuren könnten fremden Lebensformen durchaus als Bausteine dienen. Man müsste folglich unter lebenden Mikroben oder in organischen Abfällen nach Aminosäuren suchen, die kein bekannter Organismus verwendet und die auch nicht bei deren Stoffwechsel oder Zerfall entstehen.

Auch die aufblühende Forschung über künstliches Leben dürfte bei der Suche nach Aliens Anregungen bieten. Biochemiker versuchen derzeit, völlig neue Organismen zu synthetisieren, indem sie in Proteine zusätzliche Aminosäuren einfügen. Steve Benner von der Stiftung für angewandte molekulare Evolution in Gainesville (Florida) hält Proteine mit so genannten Alpha-Methyl-Aminosäuren für recht geeignet für synthetisches Leben, da sie sich gut falten. Von bekannten Organismen kennen Forscher diese Aminosäuren bisher nicht. Es sollte nicht schwer sein, künftig bei neuen Mikroben die Zusammensetzung ihrer Proteine zu bestimmen. Etablierte Methoden wie die Massenspektrometrie würden das leisten.

Falls sich dabei etwas Eigenartiges ergäbe, ständen die Wissenschaftler vor dem nächsten Problem. Sie müssten klären, ob sie wirklich einen völlig anderen Organismus erwischt haben, der sich von einem eigenen Lebensursprung herleitet, oder ob sie nicht vielmehr eine neue Domäne des bekannten Lebens entdeckt haben – was aufregend genug wäre. Dass die Archaea in unserem Stammbaum eine eigene Domäne bilden, erkannten die Forscher auch erst in den 1970er Jahren.

Höchstwahrscheinlich fußt unsere Lebensform auf Vorgängern mit noch völlig anderer, schlichterer Biochemie. Erst mit der Zeit dürften Selektionskräfte den heutigen genetischen Kode herausgearbeitet und optimiert haben. Vielleicht benutzten frühe Organismen nur um die zehn Aminosäuren, nicht zwanzig, und verschlüsselten sie nicht mit jeweils drei, son-

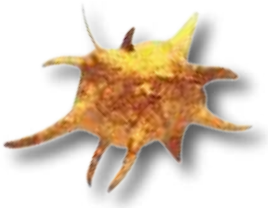
Fremdlinge im Meeresgrund?

PHOTO RESEARCHERS INC. / WHISTLER RESEARCH PTY LTD., PHILIPPA UWINS

In 200 Millionen Jahre altem Sandstein von einer Tiefseebohrung vor Westaustralien entdeckte Philippa Uwins von der Universität von Queensland winzige Strukturen, die sie »Nanobes« nennt (in der elektronenmikroskopischen Aufnahme die braunen Tröpfchen und Fortsätze). Die Gebilde sind 20 bis 150 Nanometer groß. Sie scheinen sich im Labor vermehren zu können. Auch fanden die Forscher Anzeichen für DNA. Manche Kollegen bezweifeln aber Uwins Ansicht, dass dies Lebewesen sind.

Neuartige Krankheitserreger?

Einige Forscher sind überzeugt: **Nanobakterien**, oder was immer die verdächtigen Ultrapartikel in unserem Körper sein mögen, bewirken Ablagerungen wie Nierensteine, arteriosklerotische Plaques oder auch den grauen Star.



In unserem Körper könnten Nanobakterien hausen, die unter anderem im Urin gedeihen und Nierensteine hervorrufen

dern zwei genetischen Buchstaben. Warum sollte es nicht noch irgendwo primitive Organismen geben, die mit dem alten, einfacheren Kode leben? Nur wären das nicht wirklich Aliens, sondern eher so etwas wie lebende Fossilien und von daher für die Wissenschaft ebenfalls hochinteressant. In den Szenarien vom Ursprung des Lebens kommen auch Wesen vor, deren Erbinformation noch nicht in Form von DNA vorliegt, sondern als so genannte RNA, die als ursprünglicher gilt. Auch solche Mikroben wären lebende Fossilien.

Bei noch radikaleren chemischen Unterschieden bestünde weniger Gefahr, dass eine entsprechende Lebensform bei näherem Hinsehen doch in unseren eigenen Stammbaum gehört. Astrobiologen denken zum Beispiel an den Ersatz von Wasser durch ein anderes Lösungsmittel, etwa Ethan oder Methan. Auf der Erde sind solche Umwelten schwer vorstellbar. Diese beiden Stoffe liegen nur in großer Kälte flüssig vor, etwa auf dem Saturnmond Titan.

Recht beliebt sind Szenarien, in denen an die Stelle zumindest eines der chemischen Hauptelemente unserer Lebensform ein anderes Element tritt. Bei unserer Lebensform sind das Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Phosphor. Gerade Phosphor ist eher rar. Auf der frühen Erde dürfte er in seiner löslichen, leicht verwertbaren Form nur in Spuren vorgelegen haben. Felisa Wolfe-Simon, die heute an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) arbeitet, argumentiert, dass Arsen die Rolle des Phosphors übernehmen könnte. In der Anfangszeit des Lebens hätte das manche Vorteile bedeutet. Arsen könnte nicht nur ebenso gut Biomoleküle mitgebildet oder dem Energiespeichern gedient haben, sondern es hätte zusätzlich selbst Energiequelle für den Stoffwechsel sein können. Die extreme Giftigkeit von Arsen für uns kommt ja gerade daher, dass es Phosphor so gut imitiert. Umgekehrt wäre für Lebewesen mit arsenhaltigen Biomolekülen Phosphor das reine Gift. Treiben sich solche Arsen-Organismen womöglich an arsenreichen, phosphorarmen Orten herum, etwa an heißen Quellen der Erdoberfläche oder der Tiefsee?

Vielleicht sind Schattenorganismen viel winziger als die kleinsten vertrauten Mikroben. Autonome Organismen unseres Stammbaums müssen wenigstens einige hundert Nanometer messen. Die Proteinsynthese erfolgt stets in so genannten Ribosomen, komplexen Strukturen, die selbst schon mindestens 20 Nanometer groß sind. Viren können deutlich kleiner sein als Bakterien, weil sie über diese Maschinerie nicht verfügen, sondern zur Vermehrung Zellen nutzen müssen – sie gelten darum nicht als echte, autonome Organismen. Um eine alternative Lebensform handelt es sich bei ihnen nicht. Auch deutet nichts darauf hin, dass sie von Aliens abstammen.

Einige Wissenschaftler behaupten seit Jahren, die Biosphäre sei voller winziger Zellen, die zu klein seien, um noch Ribosomen zu enthalten. Robert Folk von der Universität von Texas in Austin machte im Jahr 1990 auf kugelige und eiförmige Objekte aufmerksam, die im Sedimentgestein der heißen Quellen im italienischen Viterbo nordwestlich von Rom erkennbar sind. Der Geologe deutet diese Strukturen als versteinerte so genannte Nano- oder Nannobakterien (wie er selbst sie nennt). Es handele sich um die verkalkten Überreste dreißig Nanometer großer Organismen. Gebilde ähnlichen Aussehens entdeckte die australische Forscherin Philippa Uwins von der Universität von Queensland in Brisbane in Proben einer Tiefseebohrung vor Westaustralien (siehe Kasten S. 47). Ob die Strukturen biologischer Natur sind, ist noch heftig umstritten. Falls ja, könnten sie von alternativen Lebensformen Zeugnis geben, die ohne Ribosomen auskamen – oder auskommen? – und deswegen lange nicht so groß sein mussten beziehungsweise müssen wie die kleinsten herkömmlichen Bakterien.

Leben Aliens womöglich sogar in unserem Körper? Einige Wissenschaftler vermuten das. Bei elektronenmikroskopischen Studien an Säugerzellen im Jahr 1988 fielen einem Forscherteam um Olavi Kajander von der Universität von Kuopio (Finnland) in vielen der Zellen ultrakleine Partikel auf. Sie maßen nur um die fünfzig Nanometer, etwa ein Zehntel von normalen kleinen Bakterien. Zehn Jahre später verkündeten die finnischen Forscher, die verdächtigen Partikel seien anscheinend lebende Organismen, die im Urin gedeihen und Nierensteine hervorrufen, indem sie um

Leben vom Mars bei uns?

Falls die These stimmt, dass unter bestimmten Voraussetzungen Leben zwangsläufig entsteht, dann könnte es auch anderswo im Sonnensystem unabhängig aufgetreten sein. Insbesondere käme dafür der Mars in Frage, auf dessen Oberfläche früher flüssiges Wasser vorkam. Durch Asteroiden- und Kometeneinschläge erfolgt zwischen Erde und Mars ein gewisser Materialaustausch. Mit hoher Wahrscheinlichkeit dürften mit dem Gestein auch lebensfähige Mikroben verschleppt worden sein. In diesem Szenario hätten sich das Mars- und das Erdenleben mit der Zeit fast zwangsläufig gemischt. Somit wäre eine von manchen postulierte »Schattenbiosphäre« auf der Erde vielleicht gar nicht irdischen Ursprungs.

sich herum Mineralstoffe wie Kalzium ausfällen. Was immer die Liliputwesen darstellen – manche davon könnten durchaus ein eigenartig fremdes Leben repräsentieren.

Ob ein Mikroorganismus mit einer exotischen Biochemie als Abkömmling eines eigenen, zweiten Lebensursprungs eingestuft würde, hinge sicherlich davon ab, wie grundsätzlich diese Kreatur von bekannten Erscheinungen abweicht. Feste Kriterien, also eindeutige Merkmale können die Wissenschaftler nicht aufstellen, solange sie über die Anfänge unseres eigenen Stammbaums dermaßen wenig wissen.

Wie plötzlich fing alles an?

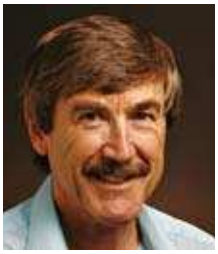
Astrobiologen fantasieren über Organismen, deren Moleküle nicht auf Kohlenstoff-, sondern auf Siliziumverbindungen beruhen. Für Leben bekannter Machart ist Kohlenstoff dermaßen entscheidend, dass ein gemeinsamer Ursprung silizium- und kohlenstoffbasierter Typen unmöglich erscheint. Würde ein fremdartiger Organismus dagegen die gleichen Nukleotide und Aminosäuren wie das bekannte Leben verwenden, aber einen anderen genetischen Kode benutzen, müsste er nicht zwangsläufig einen echten Alien darstellen. Solche Unterschiede ließen sich auch als ein Auseinanderdriften in der Evolution erklären.

Den umgekehrten Prozess kennen Biologen gleichfalls: Manchmal nähern sich Entwicklungslinien getrennter Abstammung, die ähnlichen Umwelten ausgesetzt sind, in ihren Eigenschaften an. Unter Umständen ist die verschiedene Herkunft dann nicht mehr leicht zu erkennen. In diesem Sinn könnte auf biochemischer Ebene etwa die Auswahl bevorzugter Aminosäuren einem Selektionsdruck gehorcht und sich angeglichen haben. Könnte es nicht sein, dass ein fremdes Leben zunächst eine andere Zusammenstellung nutzte, mit der Zeit aber auf die gleichen Moleküle verfiel wie vertraute Organismen?

Zwei grundverschiedene Ansätze konkurrieren darum, wie der Beginn von Leben erfolgt. Das macht es nicht gerade leichter, fremdartige Erscheinungen zu deuten. Der einen Theorie zufolge vermag Leben jäh einzusetzen – mit einer Transformation vergleichbar einem physikalischen Phasenübergang. Der könnte stattfinden, weil in einem System die chemische Komplexität eine gewisse Schwelle übersteigt. Bei dem System muss es sich keineswegs um eine einzelne Zelle handeln. Sondern ein primitives Leben mag einst aus einer Zellgemeinschaft erwachsen sein, die Stoffe und Informationen austauschte. Autonomie gewannen die Zellen erst später, und dann erst bildeten sich eigenständige Spezies aus. Nach der zweiten Theorie verläuft der Übergang von reiner Chemie zur Biologie gleichmäßig und gemächlich – so kontinuierlich, dass keine scharfe Grenze zwischen Leben und Nochnichtleben auftritt, somit auch kein spezieller Moment als Anfang des Lebens herausragt.

Sich darüber Gedanken zu machen, ob Leben mehrmals entstand, ist sinnvoll, wenn man dem Phänomen – bei allen Definitionsschwierigkeiten – zumindest eine exklusive Eigenschaft zuspricht. Als klar fassbarer Unterschied zum Unlebendigen könnte zum Beispiel gelten, dass Leben bestimmte Arten von Information speichert und verarbeitet. Definiert man Leben aber eher vage über so etwas wie organisierte Komplexität, dann verlieren sich die Wurzeln leicht in der Sphäre reiner komplexer Chemie. In diesem Fall verschiedene Lebensursprünge nachweisen zu wollen, dürfte fast unmöglich sein – es sei denn, die Organismen stammen tatsächlich aus getrennten Welten, etwa aus verschiedenen Sonnensystemen, sodass sie nie Berührung zueinander gehabt haben können.

Allein die kleine Stichprobe der unzähligen Mikroorganismen der Erde, die wir bisher genauer untersuchen konnten, hat ungeheure Überraschungen gebracht. Jede Neuentdeckung erweiterte unsere Vorstellung des biologisch Möglichen. Sicherlich harren in bisher kaum erkundeten irdischen Lebensräumen noch ganz andere exotische Wesen. Sollten Zeugnisse von einer zweiten Genesis zu Tage kommen, dürfen wir dies als starken Hinweis bewerten, dass Leben wirklich ein kosmisches Phänomen darstellt – und als Zeichen, dass wir im Universum nicht allein sind. ◁



Paul Davies ist theoretischer Physiker, Kosmologe und Astrobiologe. Zurzeit leitet er an der Arizona State University in Phoenix das Forschungszentrum »Beyond«, dessen Mitarbeiter sich mit den »großen Fragen« der Naturwissenschaften auseinandersetzen.

Ein einfacher Ursprung des Lebens. Von Robert Shapiro in: Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 64

Was ist Leben? Von Robert Hazen in: Spektrum der Wissenschaft 10/2007, S. 66

Cosmic jackpot: Why our universe is just right for life. Von Paul Davies. Houghton Mifflin, 2007

The limits of organic life in planetary systems. Von: Committee on the Limits of Organic Life in Planetary Systems, Committee on the Origins and Evolution of Life, National Research Council. National Academic Press, 2007

Finding a second sample of life on earth. Von P. Davies und C. Lineweaver in: Astrobiology, Bd. 5, S. 154, 2005

The possibility of alternative microbial life on earth. Von C. E. Cleland und S. D. Copley in: International Journal of Astrobiology, Bd. 4, Heft 4, S. 165, 2005

Life as we do not know it. Von Peter Ward. Wiking, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/943419.

BÖSARTIGE ENTZÜNDUNGEN

Eigentlich sollte das Immunsystem krebsartiges Gewebe eliminieren. Nach jüngsten Erkenntnissen schaffen es Tumorzellen aber, Teile der Körperabwehr für sich einzuspannen. Erst dadurch können sie ungehemmt wuchern.

Von Gary Stix

In Kürze

- Lange stand die Frage, wie **genetische Veränderungen** Zellen unkontrolliert wuchern lassen, im Mittelpunkt der Krebsforschung.
- In den letzten zehn Jahren setzte sich jedoch die Erkenntnis durch, dass sich Tumoren bei ihrem Wachstum auch Entzündungsreaktionen zu Nutze machen, die normalerweise der **Wundheilung** dienen.
- Die **traditionelle Chemotherapie** sollte deshalb durch eine neue Generation von Entzündungshemmern ergänzt werden, die Tumoren oder Krebsvorstufen an der Schwelle zur Bösartigkeit stoppen.

Vor mehr als 500 Millionen Jahren entwickelten die ersten vielzelligen Lebewesen ein Arsenal von Enzymen und anderen Proteinen, die speziell zur Verteidigung gegen Eindringlinge dienten. Dieses urtümliche Immunsystem unternahm einen heftigen, wohlkoordinierten Angriff auf alle Mikroorganismen oder Giftstoffe, die das Außenskelett eines Tiers aus dem Kambrium überwunden hatten: Seine Bestandteile stanzten Löcher in Zellwände, schieden chemische Gifte aus oder schluckten und verdauten den Feind einfach mit Haut und Haar. Waren die Eindringlinge besiegt, wurden die beschädigten Zellen des Organismus vom Immunsystem repariert oder – wenn sie zu stark in Mitleidenschaft gezogen waren – endgültig abgetötet.

Diese Entzündungsreaktion funktionierte so gut, dass sie in großen Teilen mehr als eine halbe Jahrmilliarde Evolution überdauerte. Woher wir das wissen? Untersuchungen ergaben, dass wir viele Immungene mit den einfachen Taufliegen gemeinsam haben, obwohl sich der Stammbaum von Wirbeltieren und Wirbellosen schon vor über 500 Millionen Jahren trennte.

Allerdings interessierten sich die Mediziner lange Zeit kaum für dieses recht grobschlächtige angeborene Immunsystem: Es galt als Truppe chemischer Haudegen, die sich blindlings auf alles stürzen, was durch irgendeine Öffnung ins Innere eines Lebewesens eingedrungen ist. Mehr Aufmerksamkeit verdiente in den Augen der Forscher das höher entwickelte adaptive Immunsystem, das mit Antikörpern und anderen Waffen gezielt einen Eindringling erkennt und unschädlich macht.

Doch vor etwa fünfzehn Jahren hat sich die Situation gewandelt. Seither ist die angeborene Immunität immer stärker ins Blickfeld der Forscher gerückt. Dahinter steckt die Erkenntnis, dass ihr grundlegendes Merkmal, die Entzündung, zu praktisch allen chronischen Erkrankungen beiträgt. Deren Liste umfasst nicht nur offensichtliche Kandidaten wie die rheumatoide Arthritis oder den Morbus Crohn (eine Darmentzündung), sondern auch Leiden wie Diabetes oder Depressionen sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, welche die häufigste Todesursache überhaupt sind (Randspalte S. 53).

Seit etwa fünf Jahren schließlich kristallisiert sich zudem eine Verbindung zum zweitwichtigsten Killer heraus: dem Krebs. »Der Zusammenhang zwischen Entzündungen und Krebs steht mittlerweile im Rampenlicht der Forschung«, sagt Robert A. Weinberg. Der bekannte Onkologe vom Whitehead Institute for Biomedical Research des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge trägt dieser Verschiebung der Schwerpunkte auch in der Neuauflage seines angesehenen Lehrbuchs »The Biology of Cancer« (Garland Science, 2006) Rechnung.

Der Wandel spiegelt die Erkenntnis wider, dass der Entzündungszustand des Immunsystems ein entscheidender Faktor im mittleren Stadium der Tumorbildung ist. Krebs beginnt mit einer Reihe genetischer Veränderungen, welche die betroffenen Zellen dazu bringen, sich übermäßig zu vermehren und in das umgebende Gewebe einzuwandern. Damit ist der Keim zur Bösartigkeit gelegt. Irgendwann können sich Tumorzellen von der Primärge-

schwulst lösen, sich an weit entfernten Stellen ansiedeln und dort neue Gewebewucherungen (Metastasen) hervorbringen.

So viel weiß man schon seit Langem. Nun aber sind weitere Einsichten hinzugekommen. Demnach werden beim Übergang von der prämalignen Gewebserkrankung zum voll entwickelten, invasiven Tumor Zellen, die normalerweise die Heilung von Schnitt- und Kratzwunden fördern, ins Umfeld der entstehenden Geschwulst umgeleitet und dort zweckentfremdet. Sie verwandeln sich dabei in Komplizen, die der Krebsentstehung Vorschub leisten. Man kann es auch so ausdrücken: Der genetische Schaden ist das Streichholz, das den Brand entfacht, und die Entzündung das Benzin, das ihn nährt.

In den neueren Lehrbüchern erscheint ein Tumor nicht mehr nur als Klumpen entarteter Zellen; er umfasst auch ein Versorgungssystem, das heißt ein Mikroumfeld, das aus Immunzellen der unterschiedlichsten Typen, hin und her laufenden chemischen Signalen sowie einem Geflecht von Blutgefäßen besteht. Der Tumor erlangt so den Status eines außerplanmäßigen Organs, das aber keine sinnvolle Aufgabe hat, wie Blut zu pumpen oder den Körper zu entgiften, sondern ausschließlich seine eigenen Zwecke verfolgt.

Mehrfache Verteidigungslinien

Bei dieser Sichtweise ist es vielleicht gar nicht nötig, den Krebs völlig auszumerzen. Mit einer entzündungshemmenden Therapie ließe sich womöglich der Schritt zur voll entwickelten Tumorzelle verhindern. Zumindest aber könnte man wohl erreichen, dass ein Tumor keine Tochtergeschwulste an weit entfernten Stellen im Körper bildet. Die Kranken würden dann zwar nicht völlig gesund, blieben aber am Leben, ähnlich wie HIV-Infizierte heute mit neuen Medikamenten den Tod hinauszögern können. »Meiner Meinung nach steht die Heilung nicht unbedingt im Vordergrund. Vielleicht ist sie gar nicht notwendig«, sagt Lisa M. Coussens, Krebsforscherin an der Universität von Kalifornien in San Francisco. »Wenn man die Krankheit in den Griff bekommt und eine natürliche Lebensdauer erreicht, ist das ein enormer Gewinn.«

Um den Zusammenhang zwischen Entzündung und Krebs zu verstehen, muss man wissen, wie der Organismus auf Eindringlinge reagiert und wie der normale Heilungsprozess in

JEFF JOHNSON, HYBRID MEDICAL ANIMATION

Die Tumorentstehung wird bei manchen Krebsformen von einer »glimmenden« Entzündung begünstigt: Der Tumor lockt Immunzellen an, sodass sie in seine Umgebung und in die bösartige Zellmasse selbst einwandern.

DIE AKTEURE

Die Zellen des angeborenen Immunsystems bilden eine erste Abwehrfront gegen Krankheitserreger. In einer zweiten Welle greifen die Komponenten des adaptiven Immunsystems die Eindringlinge dann gezielter an.

ANGEBORENES IMMUNSYSTEM

Makrophagen: Sie umschließen eingedrungene Krankheitserreger und verdauen sie. Ihre Vorläufer, die Monozyten, kreisen im Blut und verwandeln sich beim Eintreffen an der Infektionsstelle in Makrophagen.

Mastzellen: Sie setzen Histamine und andere entzündungsfördernde Substanzen frei.

Granulozyten: Die drei Zelltypen dieser Gruppe – Neutrophile, Eosinophile und Basophile – schütten teils Giftstoffe oder entzündungsfördernde Substanzen aus, können aber auch wie Makrophagen als Fresszellen wirken.

Dendritische Zellen: Sie präsentieren den Mitgliedern des adaptiven Systems Antigene (Proteinbruchstücke von Krankheitserregern oder auch Krebszellen) und regen diese so zur Vermehrung und zum gezielten Angriff gegen Träger der betreffenden Antigene an.

Natürliche Killerzellen: Sie zerstören von Krankheitserregern befallene, aber auch entartete körpereigene Zellen.

ADAPTIVES IMMUNSYSTEM

B-Zellen: Sie werden durch körperfremde Substanzen (Antigene) dazu angeregt, sich zu teilen und Antikörper zu produzieren. Diese heften sich an Eindringlinge und markieren sie so als Angriffsziele für Killerzellen.

T-Zellen: Killer-T-Lymphozyten zerstören Zellen, die ein von ihnen erkanntes Antigen tragen. Helfer- und regulatorische T-Lymphozyten koordinieren dagegen die Immunreaktion.

eine Begünstigung von Krebs umschlägt, wenn die Entzündung zu lange bestehen bleibt. Treten wir zum Beispiel in einen Nagel, werden die Bakterien, die in die Fußsohle eindringen, von einer Armee aus Proteinen und weißen Blutzellen in Empfang genommen. Dabei durchlöchern etwa zwanzig Proteine des Komplementsystems (die so heißen, weil sie andere Komponenten der Immunabwehr komplementieren, also ergänzen) die Eindringlinge, sodass sie auslaufen oder platzen. Danach machen sich die Phagozyten – wörtlich »Fresszellen« – ans Werk und beseitigen die Schweinerei. Tischmanieren haben diese pacmanartigen Makrophagen und Neutrophilen nicht: Sie umschließen und verschlingen ganz einfach die ungebetenen Gäste oder was von ihnen übrig ist.

Zur ersten Verteidigungslinie des Körpers gehören außerdem natürliche Killerzellen, Mastzellen und Eosinophile. Ihre Aufgabe besteht dabei nicht nur im Niedermetzeln der Eindringlinge, sondern auch in der Reparatur des Schadens. Entsprechend wandern Blutplättchen, die an der Blutgerinnung mitwirken, aus einer tieferen, durchbluteten Hautschicht zu der Läsion in der Oberhaut (Epidermis). Zugleich flicken Enzyme die extrazelluläre Matrix: den »Mörtel« aus Proteinen, in dem die Zellen eingebettet sind. Schorf bildet sich, die Haut wächst wieder zusammen, und die Entzündung klingt ab.

Manchmal bleibt sie jedoch bestehen. Und das ist problematisch; denn jedes Gewebe, das dauerhaft entzündet ist, weil sich die Mikroben oder Schadstoffe hartnäckig darin halten oder ein genetischer Defekt vorliegt, begünstigt Erkrankungen vom Herzinfarkt bis zum Krebs.

Fuchs im Hühnerstall

Neben dieser ersten Verteidigungslinie verfügen Wirbeltiere über weitere Waffen. Das adaptive Immunsystem ermittelt die molekularen Charakteristika der Eindringlinge und nutzt sie als Zielscheiben für seine Angriffe. Zu ihm gehören die B-Zellen – sie produzieren die Antikörper, die Krankheitserreger unschädlich machen oder für die Zerstörung markieren. Hinzu kommen die T-Zellen, die infizierte Zellen in den Selbstmord treiben. Außerdem scheiden sie Substanzen wie Interferon aus, die als Zytokine die Aktivität anderer Komponenten des Immunsystems steuern.

In den letzten Jahren ist eine Fülle von Indizien dafür zusammengekommen, dass chronische Entzündungen eine wichtige Rolle spielen können, wenn sich bestimmte Krebsformen von einer noch harmlosen prämalignen Stufe zum bösartigen Killer entwickeln. Verdachtsmomente waren schon sehr viel früher aufgetaucht. So hatte der berühmte deutsche Pathologe Rudolf Virchow 1863 bereits in bösartigem Gewebe ein »lymphoretikuläres Infiltrat« aus weißen Blutzellen nachgewiesen. Alberto Mantovani vom Istituto Clinico Humanitas der Universität Mailand wiederum stellte 1978 fest, dass sich Zellen des angeborenen Immunsystems rund um manche Krebsherde anreichern. Und 1986 bezeichnete Harold F. Dvorak von der Harvard Medical School Tumoren als »Wunden, die nicht heilen«. Doch der Schwerpunkt des Interesses lag damals woanders. Noch vor zehn Jahren hingen viele Biologen der Vorstellung an, Aufgabe des Immunsystems sei nicht nur die Beseitigung von Krankheitserregern, sondern auch das Aufspüren und Eliminieren von entarteten Krebs-Vorläuferzellen. Erst der genauere Blick auf die Mikroumgebung der Tumoren weckte schließlich Zweifel an diesem einfachen Bild.

Ende der 1990er Jahre beschäftigte sich Frances Balkwill vom Krebsinstitut der Queen Mary's School of Medicine and Dentistry in London mit dem Tumornekrosefaktor (TNF), einer Substanz aus der Gruppe der Zytokine, die als Boten im Immunsystem fungieren. Der Name bezieht sich auf die Fähigkeit dieses Stoffs, Krebszellen abzutöten, wenn er in hoher Konzentration direkt in einen Tumor gespritzt wird. Befindet er sich jedoch dauerhaft in geringer Menge in einer Geschwulst, hat er eine völlig andere Wirkung.

Als Balkwills Team das Gen für TNF bei Mäusen abschaltete, sodass die Tiere den Faktor nicht mehr produzierten, bekamen die Tiere überraschenderweise keine Tumoren mehr. »Das machte uns ungewollt zum Fuchs im Hühnerstall«, berichtet die Forscherin. »All die Leute, die TNF zu einem Medikament gegen Krebs entwickeln wollten, waren entsetzt. Sie hatten gedacht, man könne das Zytokin zur Tumortherapie einsetzen, und nun stellte sich heraus, dass es in Wirklichkeit ein körpereigener Stoff ist, der die Krankheit begünstigt.«

Verbesserte Methoden zum Erzeugen von »Knock-out-Mäusen« mit gezielt ausgeschalteten einzelnen Genen erlaubten, die Verbindung zwischen Entzündung und Krebs immer genauer zu ergründen. So schufen Coussens und ihre Kollegen Douglas Hanahan und Zena Werb Tiere, bei denen Tumorgene gentechnisch aktiviert waren. Die Nager entwickelten deshalb, wie die Forscher 1999 berichteten, Vorstufen von Krebs. Doch bildete sich daraus kein bösartiger Tumor, weil in den Mäusen das Gen für die Mastzellen (ein Bestandteil des angeborenen Immunsystems) ausgeschaltet war. Desgleichen beschrieben Jeffrey Pollard und seine Mitarbeiter am Albert Einstein College of Medicine im Jahr 2001 gentechnisch veränderte Mäuse, die anfällig für Brustkrebs waren;

bösartige Geschwulste wuchsen aber nur in Gegenwart von Makrophagen.

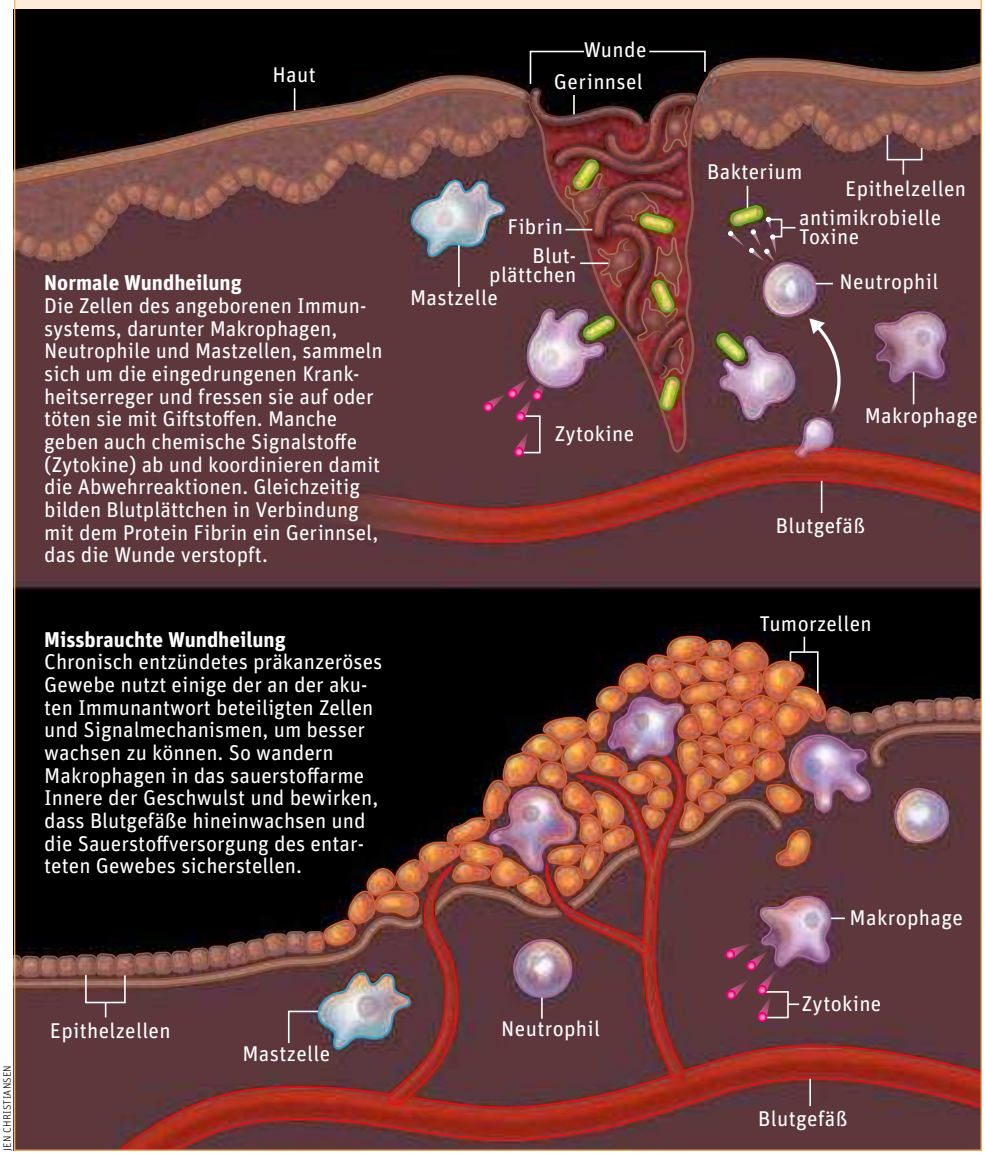
Die neuen Erkenntnisse werfen die bisherige Lehrmeinung nicht vollständig über den Haufen. Sie zeigen jedoch, welch ein zweischneidiges Schwert das Immunsystem ist. Sein Netzwerk aus Molekülen und Zellen, dessen Komplexität nur vom Gehirn übertroffen wird, steckt voller Widersprüche: Teils begünstigt es den Krebs, teils wirkt es ihm aber auch entgegen. Tatsächlich schützen manche Zellen des angeborenen Immunsystems, wie die natürlichen Killerzellen, vor dem Tumorwachstum. Andere fördern bösartige Wucherungen nur dann, wenn das Mikroumfeld in einen entzündlichen Zustand versetzt ist; ansonsten merzen sie die entarteten Zellen aus. Außerdem lassen Entzündungen zwar in vielen, aber nicht in allen Organen Tumoren entstehen – und ihre Rolle bei Blutkrebs ist noch ziemlich unklar.

Makrophagen werden zu Verrätern

Eine zwielichtige Rolle scheinen insbesondere die Makrophagen zu spielen. Einerseits können sie Krebszellen abtöten oder an die T-Lymphozyten des adaptiven Immunsystems ein Alarmsignal schicken, dass etwas nicht stimmt. Andererseits haben Pollard und andere Wissenschaftler im Detail aufgedeckt, wie

Wie Krebs die Wundheilung missbraucht

Das angeborene Immunsystem reagiert auf eine Verletzung mit einer Reihe von Gegenmaßnahmen. Krebsforscher haben jüngst erkannt, wie chronisch entzündetes präkanzeröses Gewebe einige dieser Wundheilungsprozesse ausnutzt, um besser wuchern zu können.



Normale Wundheilung
Die Zellen des angeborenen Immunsystems, darunter Makrophagen, Neutrophile und Mastzellen, sammeln sich um die eingedrungenen Krankheitserreger und fressen sie auf oder töten sie mit Giftstoffen. Manche geben auch chemische Signalstoffe (Zytokine) ab und koordinieren damit die Abwehrreaktionen. Gleichzeitig bilden Blutplättchen in Verbindung mit dem Protein Fibrin ein Gerinnsel, das die Wunde verstopft.

Missbrauchte Wundheilung
Chronisch entzündetes präkanzeröses Gewebe nutzt einige der an der akuten Immunantwort beteiligten Zellen und Signalmechanismen, um besser wachsen zu können. So wandern Makrophagen in das sauerstoffarme Innere der Geschwulst und bewirken, dass Blutgefäße hineinwachsen und die Sauerstoffversorgung des entarteten Gewebes sicherstellen.

JEN CHRISTIANSEN

GEMEINSAME URSACHE

Chronische Entzündungen spielen bei vielen Erkrankungen eine Rolle, nicht nur bei Krebs.

Herz-Kreislauf-Erkrankungen
Makrophagen nehmen das »schlechte« Cholesterin auf. Wenn sie sich dabei überfressen, bleiben sie unbeweglich an der Wand der Blutgefäße liegen. Aus solchen Ablagerungen entstehen Plaques, die zur Verengung von Arterien führen. Bleibt dort ein Blutgerinnsel stecken, ist die Blutzufuhr blockiert. Ein Herzinfarkt oder Schlaganfall kann die Folge sein.

Zuckerkrankheit
Unter der hohen Stoffwechselbelastung bei Fettsucht produzieren sowohl Zellen des angeborenen Immunsystems als auch Fettzellen (Adipozyten) so genannte Zytokine, die als Botenstoffe fungieren. Sie stören die normale Insulinfunktion und können so zu Diabetes führen.

Alzheimer-Krankheit
Mikrogliazellen, das Gegenstück der Makrophagen im Nervensystem, erzeugen bei der Interaktion mit Beta-Amyloid-Proteinen in den für die Alzheimer-Krankheit typischen Plaques Zytokine und zellschädigende freie Radikale. Die resultierende Entzündung kann die Neuronen zum Absterben bringen.

Depressionen und Schizophrenie
Bei depressiven Menschen fanden sich hohe Konzentrationen von Entzündungsfaktoren – Interleukin 6 und C-reaktives Protein – im Blut. Es gibt auch Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen erhöhtem Interleukin-2-Spiegel und Schizophrenie.

DIE ENTSTEHUNG VON KREBS

Bösartiges Gewebe entwickelt sich schrittweise über einen Zeitraum von Jahren oder sogar Jahrzehnten.

Initiation: Am Anfang stehen genetische Veränderungen, die auf ererbten Mutationen beruhen oder durch Kontakt mit Chemikalien oder Strahlung zu Stande kommen.

Promotion: Die Zellen des präkanzerösen Gewebes vermehren sich, oft unterstützt von einem Entzündungsreiz. Ihr Erscheinungsbild wird zunehmend abnormal.

Progression: Tumorzellen wandern in das umgebende Gewebe ein und verbreiten sich in Blut und Lymphknoten. Bösartig geworden, bilden sie an weit entfernten Stellen Metastasen.

Makrophagen von Krebszellen für deren Zwecke »umerzogen« werden: Sie verwandeln sich in Fabriken für Zytokine und Wachstumsfaktoren, die das Wuchern von Tumoren fördern und koordinieren.

Wenn eine Geschwulst sich vergrößert, drohen irgendwann die Zellen in ihrem Innern an Sauerstoffmangel einzugehen. Sie senden deshalb Notsignale aus. Das lockt Immunzellen an, die beim Erreichen des Tumors zu Makrophagen werden. Dort setzen Sauerstoffmangel und Botschaften der Krebszellen einen Prozess in Gang, der die frisch eingetroffenen Immunpolizisten zu Tumor-Handlangern macht. Forscher bezeichnen solche Verräter, die sich innerhalb der Geschwulst und in ihrer Umgebung aufhalten, als tumorassoziierte Makrophagen.

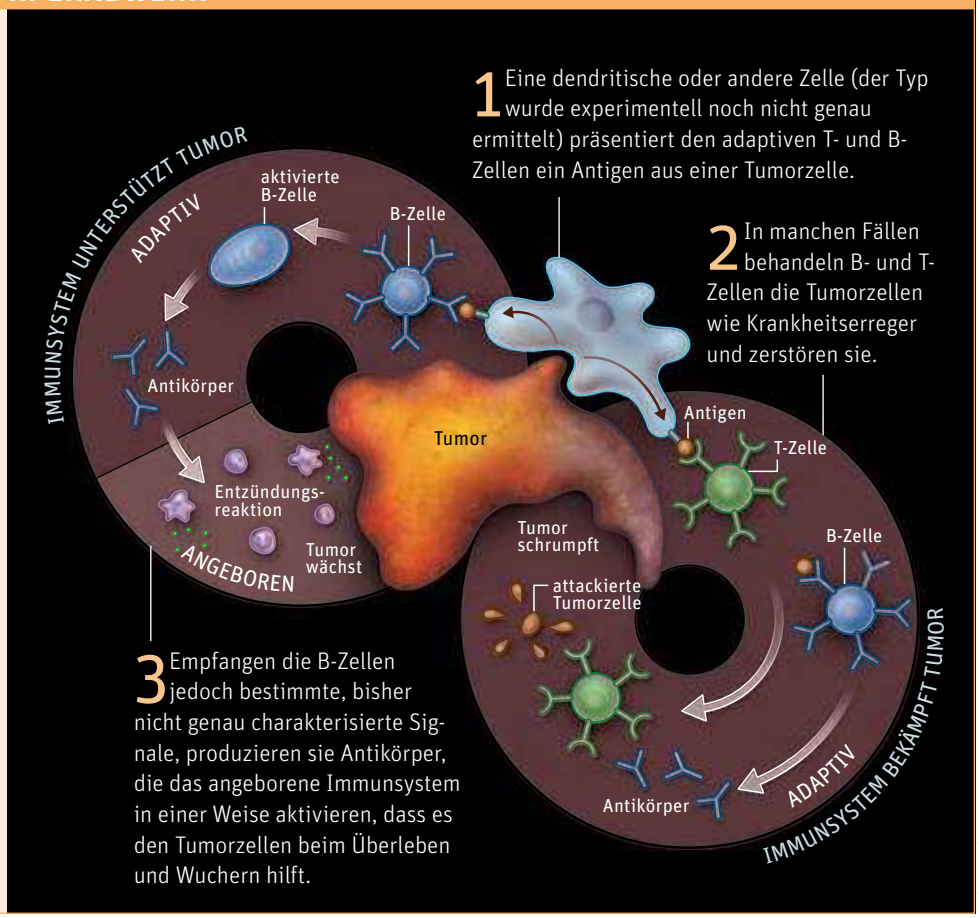
Inzwischen ließ sich der Zusammenhang zwischen Entzündung und Krebs sogar bis hin zu einzelnen Signalmolekülen zurückverfolgen. Eines davon ist NF-κB *(nuclear factor-kappa B)*. Es handelt sich um einen Komplex aus Proteinen, der als eine Art Hauptschalter etliche Gene von Entzündungsfaktoren aktivieren sowie den Zelltod steuern kann. Die biologischen Prozesse, an denen er beteiligt ist, wurden von berühmten Wissenschaftlern wie den Nobelpreisträgern David Baltimore und Philip Sharp aufgeklärt. Diese beantragten für alle darauf beruhenden Methoden zur Medikamentenentwicklung übrigens Patentschutz. Darüber ist ein Rechtsstreit entbrannt, bei dem es um viele Millionen Dollar geht.

Im Jahr 2004 berichteten Yinon Ben-Neriah und seine Kollegen an der Hebräischen Universität in Jerusalem über Versuche mit Mäusen, die gentechnisch so verändert waren, dass sie chronische Hepatitis bekamen. Normalerweise entwickelt sich daraus mit der Zeit Leberkrebs. Bei diesen Tieren blieb es jedoch bei der Vorstufe dazu, wenn durch eine Genmanipulation die Produktion von NF-κB gedrosselt war. Das Gleiche ließ sich durch Zugabe von Antikörpern erreichen, die sich an das entzündungsfördernde Signalmolekül TNF hefteten und es so am Andocken an seinen Rezeptor auf den prämalignen Leberzellen hinderten. Dadurch konnte der Botenstoff die Kaskade molekularer Vorgänge, die sonst den NF-κB-Hauptschalter umlegt, nicht mehr auslösen. Ohne aktives NF-κB aber wurde in den präkanzerösen Leberzellen die Apoptose, also der programmierte Zelltod, in Gang gesetzt.

ZWEISCHNEIDIGE KÖRPERABWEHR

Während das angeborene und das adaptive Immunsystem bei der Bekämpfung körperfremder Substanzen optimal zusammenarbeiten, treten bei Krebs paradoxe Effekte auf.

Das angeborene System entfesselt gegen eingedrungene Mikroorganismen eine erste Abwehrschlacht, indem es alle körperfremden Strukturen unterschiedslos angreift. Das adaptive System schaltet sich später ein und nimmt dann gezielt einzelne Erreger aufs Korn. Auch bei Krebserkrankungen attackieren beide Abwehrkomponenten die Tumorzellen. Aber das angeborene Immunsystem lässt sich hinters Licht führen und als Helfer missbrauchen.



JEN CHRISTIANSEN

Im gleichen Jahr publizierten Michael Karin und seine Kollegen an der Universität von Kalifornien in San Diego ein ganz ähnliches Resultat. In ihren Versuchen mit genmanipulierten Mäusen, die eine chronische Darmentzündung und als Folge davon oft Darmkrebs entwickeln, leitete die Blockade von NF-κB ebenfalls die Apoptose ein. Außerdem entstanden auch dann keine bösartigen Tumoren, wenn die Forscher in Makrophagen und anderen Immunzellen den zugehörigen Signalweg unterbanden.

All dies belegt, dass Entzündungen die Umwandlung von Krebsvorstufengewebe in richtige Tumoren der verschiedensten Typen begünstigen. Doch damit nicht genug: Es gibt Indizien, wonach sie auch in den Anfangsstadien der Krebsentstehung und bei der Bildung von Metastasen eine Rolle spielen könnten. So lässt eine Infektion mit dem Bakterium *Helicobacter pylori*, das Magenentzündungen hervorruft, zugleich das Magenkrebsrisiko emporschnellen, und das Hepatitis-C-Virus kann Leberkrebs verursachen. Zudem setzt das Immunsystem beim Kampf gegen Krankheitserreger auch freie Radikale ein, die unter Umständen das Erbgut schädigen. Dennoch deuten nur wenige Untersuchungen bisher darauf hin, dass Entzündungen allein Mutationen bewirken und so Krebs auslösen.

An der Bildung von Metastasen könnten sie schon eher beteiligt sein. Jüngste Erkenntnisse sprechen jedenfalls dafür. Wie Karins Arbeitsgruppe vor knapp einem Jahr berichtete, liegt es nicht an den genetischen Veränderungen, sondern an Entzündungen, wenn in gentechnisch erzeugten »Prostatakrebs-Mäusen« Metastasen entstehen. Den Untersuchungen dieses Teams zufolge drosselt ein von Entzündungszellen im Umfeld des Primärtumors ausgeschüttetes Zytokin in den Krebszellen die Produktion eines Proteins, das die Metastasierung blockiert. Das erklärt, wie Karin anmerkt, vielleicht auch die rätselhafte Beobachtung, dass das Ausstechen von Gewebe aus einem Tumor – etwa bei einer Prostatabiopsie – die Metastasenbildung zu begünstigen scheint. Schuld wäre die durch den Eingriff verursachte Entzündung.

Ebenfalls vor einem Jahr veröffentlichte Pollards Team analoge Ergebnisse. Ihm war der Nachweis gelungen, dass abgelöste Zellen eines Brusttumors bei Mäusen auf ihrer Wanderung zu den Blutgefäßen, in denen sie mit

Der genetische Schaden ist das Streichholz, das den Brand entfacht, und die Entzündung das Benzin, das ihn nährt

Das Immunsystem als Helfer gegen Krebs

Lange galt als ausgemacht, dass das Immunsystem Tumorzellen genauso bekämpft wie eingedrungene Krankheitserreger. Es in diesem Kampf zu unterstützen war deshalb das Ziel vieler Ansätze zur Krebstherapie. Die Ergebnisse erfüllten die hochgesteckten Erwartungen jedoch nicht.

Am besten funktionierten noch monoklonale Antikörper: künstlich erzeugte Moleküle, die ein bestimmtes Antigen, beispielsweise ein Proteinfragment auf der Oberfläche von Krebszellen, gezielt angreifen. Sie werden von Mäusen produziert und dann dem Patienten gespritzt – die Antikörperproduktion erfolgt also nicht durch das eigene Immunsystem des Patienten. Deshalb spricht man von »passiver« Immuntherapie.

Zur »aktiven« Immuntherapie dienen dagegen Krebsimpfstoffe. Sie waren das Ziel jahrzehntelanger Forschungsbemühungen. Dem Patienten wird dabei ein Antigen gespritzt – meist zusammen mit einem Hilfsstoff, der die Immunreaktion verstärkt.

Krebsantigene sind schwieriger zu identifizieren als solche von Krankheitskeimen; denn Tumorzellen stammen ja von körpereigenem Gewebe ab. Oft erkennt das adaptive Immunsystem sie deshalb nicht als fremd, und wenn sich doch eine Abwehrreaktion entwickelt, kann der Tumor den Organismus dazu bringen, sie auszuschalten.

Nachdem Hunderte von Versuchen keinen wirklich überzeugenden Beleg dafür erbracht haben, dass Impfstoffe zur Rückbildung von Tumoren führen, mehren sich die Zweifel an dem Konzept. »Die Verabreichung eines Krebsimpfstoffs regt zwar manchmal die Bildung von T-Zellen dagegen an; diese sind aber nicht wirksam genug, um das Tumorwachstum zu verhindern«, sagt Steven Rosenberg, Chefchirurg am National Cancer Institute in Bethesda (Maryland). Er beschreitet deshalb einen anderen Weg (Spektrum der Wissenschaft 7/1990, S. 56). Dabei entnimmt er dem Patienten weiße Blutkörperchen und isoliert daraus T-Zellen, die den Tumor erkennen. Diese vermehrt er im Labor und überträgt sie zurück auf den Krebskranken, dessen Immunsystem davor medikamentös unterdrückt wurde. In einem entsprechenden Versuch, dessen Ergebnisse 2005 erschienen sind, bildeten sich bei etwa der Hälfte von 35 Patienten mit schwarzem Hautkrebs (Melanom) die Tochtergeschwulste (Metastasen) mindestens teilweise zurück.

Generell scheinen sich die Aussichten für die Immuntherapie jüngst etwas verbessert zu haben. Auf der Jahrestagung der American Association for Cancer Research im April letzten Jahres gab es frühe positive Berichte über Impfstoffe gegen Brust- und Prostatakrebs sowie Hals- und Kopftumoren. Doch die schlechte Nachricht kam nur einen Monat später. Da vertagte das US-Gesundheitsministerium die Zulassung für das Mittel »Provenge«, das die Firma Dendreon aus Seattle gegen Prostatakrebs entwickelt hat, und verlangte weitere Wirksamkeitsnachweise. Provenge wäre der erste kommerziell erhältliche Krebsimpfstoff in den USA gewesen.

Die Körperabwehr für den Kampf gegen Krebs einzuspannen scheint also immer noch möglich. Aber um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Mediziner besser verstehen, wie das zweischneidige Schwert Immunsystem die Krebsentstehung nicht nur verhindert, sondern auch begünstigt.

Die gängige Chemo- und Strahlentherapie zielt einzig darauf ab, Krebszellen abzutöten. Nach den neuen Erkenntnissen aber sollte man zusätzlich die Entzündung dämpfen

dem Blutstrom schließlich an weit entfernte Stellen gelangen, von Makrophagen begleitet werden und von diesen ständig chemische Signale empfangen.

Bei der Klärung des Zusammenhangs zwischen Entzündungen und Krebs stand und steht das angeborene Immunsystem im Vordergrund. Aber lässt sich die adaptive Abwehr – die T-Zellen und die von B-Zellen produzierten Antikörper gegen bestimmte Moleküle von Eindringlingen – wirklich von jeder Schuld freisprechen? Lange galt Krebs als Folge eines Versagens dieser Körperpolizei, der die entarteten Zellen durch die Lappen gehen. Schon seit Jahrzehnten gab es daher immer wieder Bemühungen, T-Lymphozyten scharfzumachen, sodass sie Krebszellen besser erkennen und bekämpfen (Spektrum der Wissenschaft 1/1990, S. 38). Doch die Ergebnisse waren eher enttäuschend (siehe den Kasten auf S. 55).

Inzwischen zeichnet sich ab, dass intensive Wechselbeziehungen zwischen den Zellen des angeborenen und des adaptiven Immunsystems existieren. Dieser Austausch könnte auch die Entstehung bösartiger Tumoren begünstigen. Das sollten Forscher bedenken, die einen Impfstoff gegen Krebs entwickeln wollen. Wie eine Untersuchung ergab, produzieren Eierstocktumoren ein Signalmolekül, das regulatorische T-Zellen anlockt. Diese Komponenten des adaptiven Immunsystems dämpfen eine überschießende Körperabwehr (Spektrum der Wissenschaft 8/2007, S. 54).

Blockade von Krebs

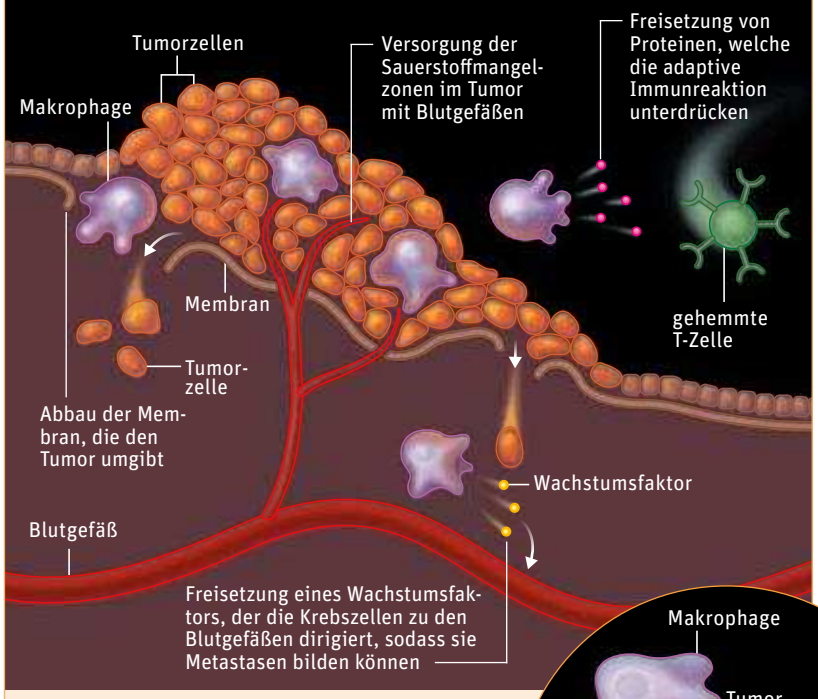
Noch vielsagender ist ein Befund, den Coussens und ihre Kollegen schon 2005 veröffentlichten: Entfernt man die Antigen produzierenden B-Zellen aus Mäusen, die auf Grund gentechnischer Manipulationen stark zu Hautkrebs neigen, bleiben Gewebeveränderungen und Gefäßneubildung (Angiogenese) aus – beides Voraussetzungen für das Fortschreiten der Krebserkrankung. Normalerweise bekämpfen die Antikörper der B-Zellen Krankheitserreger, indem sie im Blut kreisen und Viren oder Bakterien markieren, sodass diese von Zellen des angeborenen Immunsystems abgetötet werden. Auf ein Signal aus dem prämalignen Krebsgewebe hin veranlassen sie das angeborene Immunsystem jedoch zur Mitwirkung an der Tumorgenese.

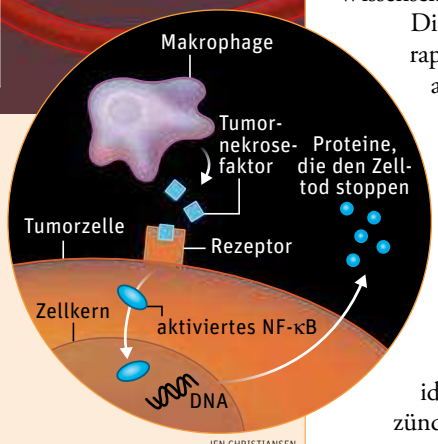
Unklar ist freilich, was diesen Vorgang letztlich auslöst. Denkbar wäre, dass eine Krebszelle ein Signal an Komponenten des angeborenen Immunsystems – etwa dendritische Zellen – sendet, die dann die B-Lymphozyten aktivieren. An der Übertragung dieses Signals könnten toll-ähnliche Rezeptoren (TLR) beteiligt sein, die sich als wichtige Zwischenstationen für die Kommunikation innerhalb des Immunsystems erwiesen haben (Spektrum der Wissenschaft 8/2005, S. 68).

Die gängige Chemo- und Strahlentherapie zielt einzig darauf ab, Krebszellen abzutöten. Nach den neuen Erkenntnissen aber sollte man zusätzlich die Entzündung dämpfen. Ohne Makrophagen und andere Zellen des angeborenen Immunsystems bliebe die Wucherung im prämalignen Stadium stecken. Dann würde Krebs zu einer chronischen, aber nicht tödlichen Krankheit – ähnlich der rheumatoiden Arthritis, die ebenfalls einen entzündlichen Vorgang darstellt. »Die wenigsten sterben am Primärtumor«, sagt Ray-

Die Rolle der Fresszellen

Die Makrophagen sind als Entzündungszellen an vielen Schlüsselprozessen der Krebsentstehung beteiligt – von der Sauerstoffversorgung des Tumors bis zu seiner Ausbreitung im Körper.





JEN CHRISTIANSEN

Ein Hauptschalter
Makrophagen produzieren entzündungsfördernde Substanzen wie den Tumornekrosefaktor, die in der Tumorzelle einen Gen-»Schalter« umlegen können. Dabei handelt es sich um einen Proteinkomplex namens NF-κB *(nuclear factor-kappa B)*. In aktivierter Form wandert er in den Zellkern und kurbelt dort die Produktion von Proteinen an, die den Zelltod verhindern, die Entzündung verstärken und die Zellteilung anregen.

mond DuBois, Leiter des Krebszentrums der Universität von Texas und Experte für die Tumortherapie mit Entzündungshemmern. »Fast immer sind Metastasen die Todesursache.«

Ein Medikament gegen chronische Entzündungen einzunehmen erscheint weniger rabiat als das Abtöten bösartiger (und zwangsläufig auch gesunder) Zellen mit der chemischen Keule. Für sich allein wäre ein solcher Wirkstoff möglicherweise derart harmlos, dass ihn Menschen mit sehr hohem Krebsrisiko sogar jeden Tag zur Vorbeugung einnehmen könnten. Wie epidemiologische und klinische Studien nahelegen, ließe sich selbst mit einfachen nichtsteroidalen Entzündungshemmern wie Aspirin der Entstehung gewisser solider (fester) Tumoren entgegenwirken.

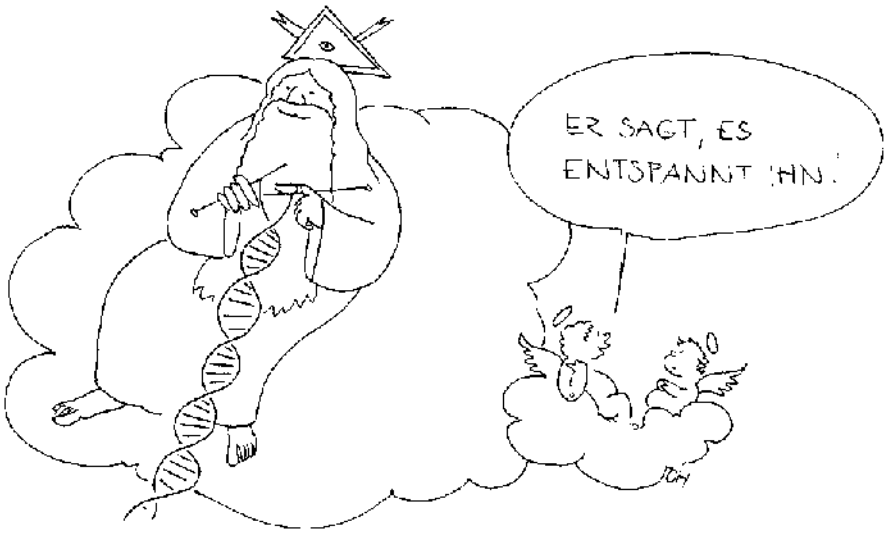
Medikamente gegen allgemein bekannte entzündliche Erkrankungen, die jahrzehntelang mühsam entwickelt wurden, könnten jetzt der Krebstherapie zugutekommen. Denkbar wäre, sie wie in der HIV-Therapie mit anderen Wirkstoffen zu »Cocktails« zusammenzustellen. Das Gemisch enthielte dann auch zelltötende Substanzen und Angiogenesehemmer wie Avastin; dieser Wirkstoff drosselt die Produktion des Wachstumsfaktors VEGF, der die Gefäßneubildung anregt.

Hemmstoffe für TNF, die schon zur Behandlung von Leiden wie der rheumatoiden Arthritis und des Morbus Crohn zugelassen sind, werden derzeit in klinischen Studien an soliden Tumoren und Blutkrebs erprobt. Das Medikament Rituxan – ein monoklonaler Antikörper, der bei rheumatoider Arthritis und B-Zell-Lymphom die B-Zellen zügelt – verhindert möglicherweise auch entzündliche Reaktionen, die der Bildung bösartiger Geschwulste Vorschub leisten. Weitere Kandidaten sind andere Zytokine und verwandte Moleküle wie IL-6, IL-8 und CCL2 sowie NF-κB.

Einige bekannte Substanzen, darunter nichtsteroidale Entzündungshemmer und ein Inhaltsstoff der Gelbwurz (Kurkuma), entfalten ihre Wirkung zumindest teilweise über die Blockade von NF-κB. Große Pharmaunternehmen entwickeln selektive Hemmstoffe für diesen molekularen Dreh- und Angelpunkt; viele davon zielen auf Enzyme, welche die Aktivität von NF-κB regulieren – etwa die I-κB-Kinase.

Ein chemischer Trojaner

Die Arbeitsgruppe von Claire Lewis an der Universität Sheffield (Großbritannien) beschäftigt sich mit einem besonders ehrgeizigen Therapiekonzept. Es nutzt die natürliche Neigung der Makrophagen, in sauerstoffarmes Gewebe wie das von Tumoren einzuwandern. Die Wissenschaftler sorgen durch gentechnische Manipulationen dafür, dass die Fresszellen ein speziell präpariertes Virus als trojanisches Pferd in die hypoxischen inneren Regionen einer Geschwulst tragen, die wegen der fehlenden Durchblutung für herkömmliche Medikamente unzugänglich bleiben. Jeder Makrophage setzt dort tausende Exemplare des Trojaners frei, die nun die Krebszellen infizieren – was bisher allerdings nur in einer Gewebekultur erprobt wurde. Anschließend aktiviert ein Protein in den Tumorzellen ein Virusgen, das für die Synthese eines Zellgifts sorgt. »Der Makrophage wandert in die Geschwulst, fördert dort aber nicht wie üblich die Tumorentwicklung, sondern macht das, was wir wollen«, sagt Lewis.



Praktikable Strategien zur Krebstherapie mit Entzündungshemmern müssen allerdings erst noch entwickelt werden. An Immunzellen herumzudoktern, die der Abwehr von Krankheitserregern dienen, ist nicht ohne Risiko. Auch DuBois hält das für heikel. »Wenn man das Immunsystem künstlich herunterfährt, bekommt man genau wie bei Aids Probleme mit opportunistischen Infektionen.«

Tatsächlich scheinen TNF-Hemmer, wie ihr Einsatz bei anderen entzündlichen Erkrankungen gezeigt hat, die Gefahr von Tuberkulose und weiteren Infektionskrankheiten, ja vielleicht sogar Lymphknotenkrebs zu bergen. Desgleichen kann die Unterbrechung der NF-κB-Signalkaskade paradoxerweise der Tumorentstehung Vorschub leisten. Die Blockade des Hauptschalters für Entzündungsreaktionen führt manchmal zum Absterben von Zellen, gefolgt von einer abnormen Regeneration des betreffenden Gewebes, die unter Umständen Krebs auslöst.

Dennoch sieht es so aus, als würde schon bald eine neue Generation entzündungshemmender Wirkstoffe das Arsenal der Chemotherapeutika bereichern. Wenn man nicht nur die mutierten Zellen bekämpft, sondern auch das glimmende Feuer rund um den Tumor, könnte Krebs zu einer Krankheit werden, mit der sich leben lässt. ◁

Gary Stix ist Redakteur bei Scientific American.

Paradoxical roles of the immune system during cancer development. Von Karin de Visser et al. in: Nature Reviews Cancer, Bd. 6, Nr. 1, S. 24, Januar 2006

Distinct role of macrophages in different tumor microenvironments. Von Claire E. Lewis und Jeffrey W. Pollard in: Cancer Research, Bd. 66, Nr. 2, S. 605, 15. 1. 2006

Smoldering and polarized inflammation in the initiation and promotion of malignant disease. Von Frances Balkwill et al. in: Cancer Cell, Bd. 7, Nr. 3, S. 211, März 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/940417.

HERZPROTHETIK

Eine Pumpe für die Pumpe

»Linksventrikuläre Unterstützungssysteme« helfen angeschlagenen Herzen bei der Arbeit.

Verrichtet die linke Herzhälfte ihre Arbeit nur noch ungenügend und ein Spenderorgan ist noch nicht verfügbar, helfen mechanische Pumpen, den Kreislauf aufrechtzuerhalten. In Europa bringen sie das Blut heute meist mittels Rotoren in Fluss. Die erste Gerätegeneration imitierte die Funktion des Herzmuskels durch Membranpumpen, die aber deutlich mehr Einbauraum benötigen.

Von Stefanie Reinberger

Den alten Ägyptern galt das Herz als Sitz des Verstands, doch seit dem 17. Jahrhundert ist seine zentrale Bedeutung für den Blutkreislauf bekannt: Das Herz, genauer gesagt der linke Teil dieses Hohlmuskels, pumpt Blut durch den Körper und versorgt so Muskeln, Nerven und Organe mit Nährstoffen und Sauerstoff. Die rechte Hälfte ist für den Lungenkreislauf zuständig. Sie treibt venöses Blut, das vom Körper zurückströmt, in die Lunge, wo es erneut mit dem lebensnotwendigen Gas angereichert wird. Danach erreicht es die linke Herzhälfte – bereit für die nächste Runde.

Was aber, wenn die Pumpe ihre Aufgabe nicht mehr in ausreichendem Maß erfüllt? Verschiedene Erkrankungen des Herzmuskels, so genannte Kardiomyopathien, können der Grund für eine solche Herzinsuffizienz sein, ebenso wie Herzinfarkt und Myokarditis, eine Entzündung des Herzmuskels, die auch bei jungen Menschen ohne auffällige Vorgeschichte auftreten kann. Helfen weder Medikamente noch ein Eingriff, ist eine Herztransplantation das letzte Mittel.

Bis ein Spenderorgan zur Verfügung steht, verstreicht oft eine lange Zeit. Um sie zu überbrücken, wurden Herzunterstützungssysteme entwickelt. Da meist die linke Hälfte betroffen ist – sie muss für den Körperkreislauf einen rund fünfmal höheren Druck aufbauen als ihr rechtes Pendant –, handelt es sich bei einem Großteil der Geräte um linksventrikuläre Unterstützungssysteme, kurz LVAD genannt (Left Ventricular Assist Device). Seit vor rund zwanzig Jahren die ersten Geräte auf den Markt kamen, ist die Entwicklung so weit fortgeschritten, dass LVADs auch für einen dauerhaften Einsatz geeignet sind; in Einzelfällen kann sogar die risikoreiche Transplantation ganz entfallen.

Jede Herzhälfte besteht aus einem Vorhof, in dem sich das Blut sammelt, und der eigentlichen Herzkammer. In der systolischen Arbeitsphase kontrahiert die Kammermuskulatur und pumpt das Blut so in die Arterien; diese Druckwelle lässt sich als Puls ertasten. Ein Ventil aus Bindegewebe, die Segelklappe, verhindert einen Rückstrom. Anschließend entspannt sich die Kammer wieder, und durch den damit einhergehenden Druckabfall wird erneut Blut vom Vorhof eingesaugt. Während dieser als Diastole bezeichneten Phase verhindern die so genannten Taschenklappen an der Öffnung zu den Arterien einen Rückfluss aus dem Körper.

Diesen Vorgang ahmen LVADs der ersten Generation nach. Die Pumpe besteht aus einer Blut- und einer Luftkammer, die eine Membran trennt; eine Heparinbeschichtung verhindert die Gerinnung. Über Einlass- und Auslasskanülen ist die Blutkammer mit Herz und Gefäßen verbunden. Ein dünner Schlauch verbindet die Luftkammer mit einem pneumatischen Antrieb, der abwechselnd Über- und Unterdruck in der Luftkammer erzeugt. Diesen Wechsel reicht die Membran an die Blutkammer weiter, die Flüssigkeit wird dadurch angesaugt beziehungsweise ausgetrieben; Ventile geben auch hier die Strömungsrichtung vor. Das rhythmische Pumpen ist bei den Patienten als Puls fühlbar, man spricht daher auch von pulsatilen Geräten. Solche Systeme brauchen aber viel Platz. Die Pumpe trägt der Patient außerhalb des Körpers, Antrieb und Energieversorgung führt er in einem Trolley mit sich.

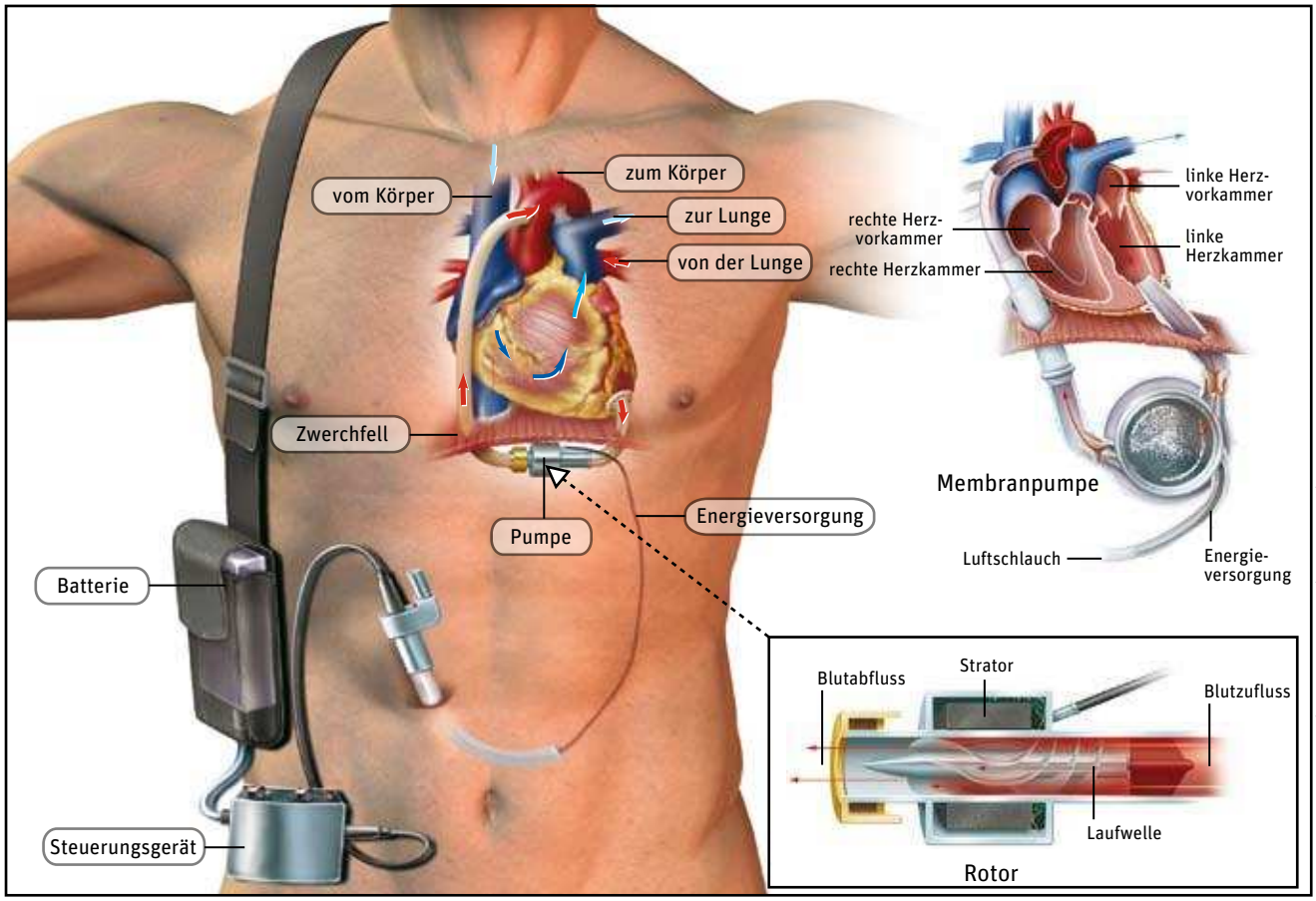
Unterstützungssysteme der zweiten und dritten Generation hingegen sind mit einem Rotor ausgestattet, der das Blut kontinuierlich fließen lässt. Ein Puls ist dann freilich nicht mehr tastbar, allenfalls noch schwach, je nach verbleibender Eigenleistung des Herzens. Der Vorteil: Die Geräte sind wesentlich kleiner, mitunter nur noch zwölf Zentimeter lang und drei Zentimeter im Durchmesser. Daher lassen sich diese linksventrikulären Unterstützungssysteme vollständig implantieren. Nur Batterien und Steuergeräte liegen noch außerhalb des Körpers, sie passen in eine Umhängetasche.

Bei diesen moderneren, aber auch teureren Systemen passiert das vom Herzen kommende Blut zunächst ein Vorleitrad. Das leitet es in den Rotor ein, der sich rund 5000- bis 10 000-mal pro Minute dreht und die eigentliche Pumpleistung erbringt. Das Blut bekommt dadurch aber einen Drall, ein Nachleitrad gleicht dies wieder aus. Es erzeugt außerdem zusätzlichen Druck und leitet das Blut über die Auslasskanüle in die Aorta.

Eine weitere Verbesserung bringt die dritte Gerätegeneration. Der Rotor schwebt in einem Magnetfeld und dreht sich dank dieser Lagerung ohne Reibungswiderstand. Es entsteht keine Wärme und die Abnutzung wird minimiert. Derart ausgestattete Geräte lassen sich über Jahre hinweg verwenden.

In Sachen LVAD hat Europa im Vergleich zu den in der Hochtechnologie oft tonangebenden USA die Nase vorn. Während in den Vereinigten Staaten gerade mal ein Teil der Geräte der zweiten Generation zugelassen ist, profitieren Patienten in Europa bereits von modernsten Geräten der dritten Generation. Der deutsche Hersteller Berlin Heart erhielt schon im Jahr 2003 die Zertifizierung für die bislang einzige Pumpe mit magnetischem Rotor.

Die promovierte Biologin **Stefanie Reinberger** arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



MANN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM; DETAILGRAFIKEN (HERZEN UND ROTOR): KENT SNODGRASS, PRECISION GRAPHICS, NACH: THORATEC UND MICROMED CARDIOVASCULAR INC.

Wussten Sie schon?

▶ **Herzunterstützungssysteme sind keine Kunstherzen**. Nur wenn das natürliche Organ gar nicht mehr arbeitet oder zu große Bereiche des Gewebes abgestorben sind, wird es vollständig entnommen und bis zur Transplantation durch eine künstliche Pumpe ersetzt. Solange das Herz noch eine Restleistung erbringt, darf es weiter schlagen und wird maschinell unterstützt. So bricht der Blutfluss bei einem Gerätedefekt auch nicht völlig zusammen. Außerdem kann der Einsatz eines Unterstützungssystems in einigen Fällen – insbesondere bei Herzmuskelentzündungen – dazu führen, dass sich das Pumporgan vollständig erholt und wieder selbstständig arbeiten kann.

▶ **Für Patienten mit rechtsseitiger Herzinsuffizienz,** einem sehr seltenen Krankheitsbild, stehen derzeit noch keine Geräte zur Verfügung, die den linksventrikulären Unterstützungssystemen der zweiten und dritten Generation entsprechen. Hier herrscht noch die Technik der Membranpumpen vor. Solche Systeme kommen außerdem bei sehr kleinen Patienten zum Einsatz, deren Brustkorb zu wenig Platz für ein implantierbares LVAD bietet, also beispielsweise bei Kindern.

▶ **Bereits 1952 gelang erstmals** eine mechanisch assistierte Kreislaufunterstützung. Es handelte sich dabei um einen kardiopulmonalen Bypass, mit dem das Blut – etwa während eines chirurgischen Eingriffs am Herzen – an Herz und Lunge vorbeigeleitet wurde. Für längere Überbrückungszeiten sind solche Systeme jedoch nicht geeignet. 1965 wurde die erste intraaortale Ballonpumpe eingesetzt: Ein zylindrischer Kunststoffballon wurde in die Brustschlagader vorgeschoben, rhythmisches Aufblasen mit Helium und anschließendes Ablassen des Gases unterstützte die Pumpleistung des Herzens. Über den erfolgreichen Einsatz eines LVADs und die Überbrückung der Zeit bis zur Transplantation wurde erstmals 1985 berichtet.

▶ **In Deutschland erhalten heute** rund 200 Patienten pro Jahr ein LVAD, europaweit sind es etwa 500.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Energieversorgung in Zeiten des Klimawandels

Wind, Wasser und Sonne werden uns frühestens in einigen Jahrzehnten maßgeblich mit Energie versorgen können. Zur Überbrückung bis dahin bieten sich in Deutschland die bereits laufenden Kernkraftwerke an – es sei denn, man akzeptiert den Bau vieler neuer Kohlekraftwerke und entsprechend höhere Emissionen des Treibhausgases Kohlendioxid.

FOTO KOHLEKRAFTWERK: SANDOR JACKAL / FOTOLIA; RECHTS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Von Konrad Kleinknecht

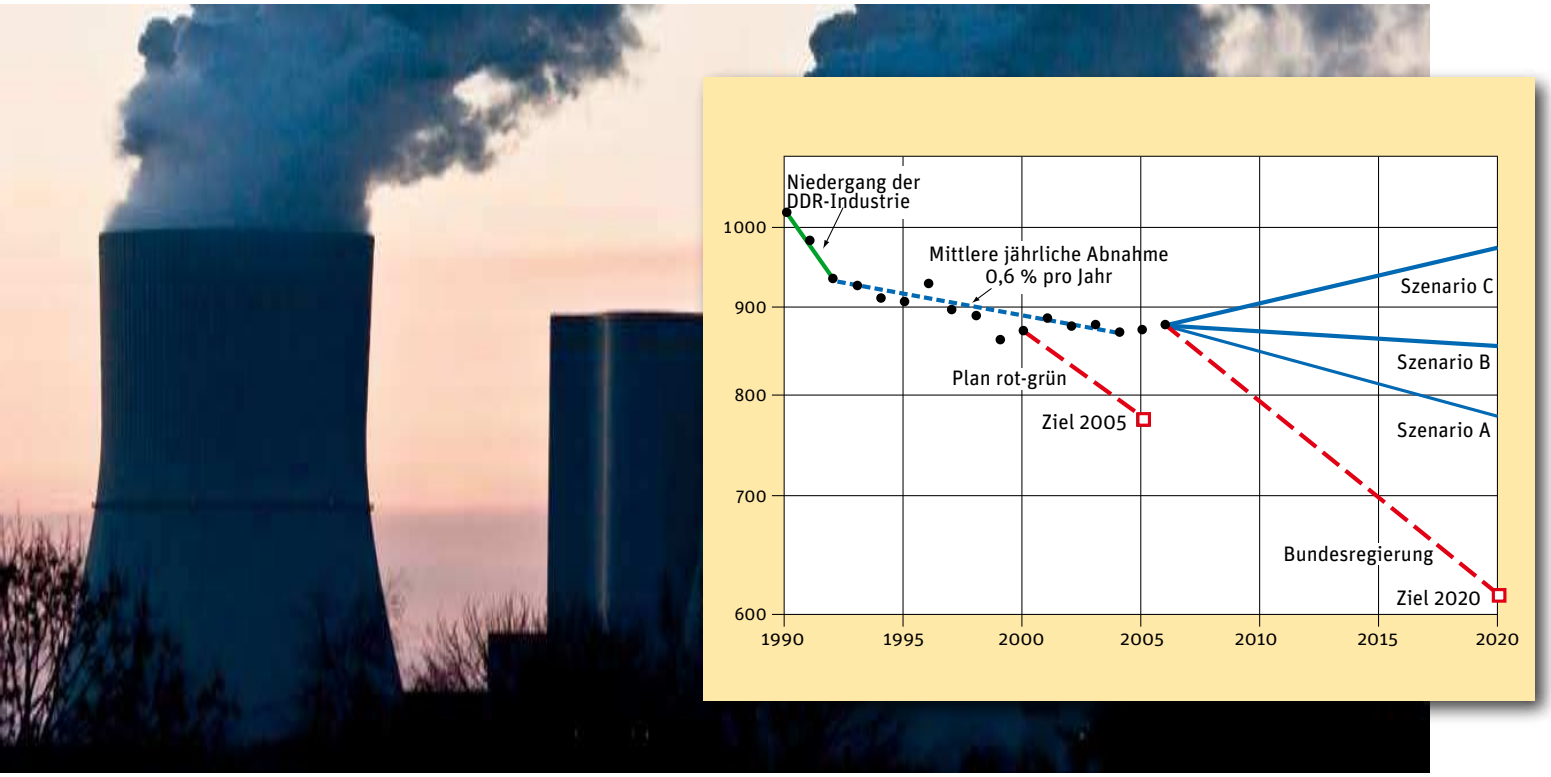
Der Wandel des Erdklimas ist Realität. Hauptverursacher ist das Treibhausgas Kohlendioxid, das bei der Verbrennung von Kohle, Öl oder Erdgas entsteht. Jährlich entweichen weltweit 28 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre, die so zum Endlager für dieses Treibhausgas wird. Einmal entstanden, kann es von dort nicht mehr zurückgeholt werden.

Beim G8-Gipfel in Heiligendamm im Sommer 2007 wurde deshalb als Ziel festgelegt, den Ausstoß von Kohlendioxid bis zum Jahr 2020 gegenüber 1990 um 20 Prozent zu senken. Die Europäische Union hat dieses Ziel übernommen. Deutschland muss dafür am stärksten reduzieren, weil es im Vergleich zu allen anderen europäischen Ländern pro Einwohner am meisten CO_2 produziert. Die Bundesregierung plant, den Ausstoß bis zum Jahr 2020 um 30 Prozent zu senken. Der Acht-Punkte-Plan des Bundesumweltministeriums (BMU) stellt sogar eine Reduzierung um 40 Prozent als erreichbares Ziel dar. Beide Ziele liegen fernab der Realität.

In Deutschland sind Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke mit mehr als 300 Millionen Tonnen Kohlendioxid jährlich etwa für ein Drittel der Emissionen verantwortlich (siehe Grafik S. 63). Zusammen mit den Erdgaskraftwerken liefern sie mehr als die Hälfte unseres Stroms. Klimapolitisches Ziel sollte es sein, neben Energieeinsparung und Effizienzsteigerung die Emission von Treibhausgasen bei der Stromerzeugung abzusenken.

Seit 1990 haben die CO_2-Emissionen in Deutschland abgenommen, wobei der Rückgang zur Hälfte auf dem Niedergang der Industrie in den östlichen Bundesländern beruht (siehe Grafik rechts). Lässt man den Anteil der vereinigungsbedingten Reduktionen in den Jahren 1990 und 1991 weg, sank in den weiteren Nachwendejahren von 1992 bis 2004 die Kohlendioxid-Emission zwar gleichmäßig, aber jährlich nur noch um 0,6 Prozent. Das ist unbefriedigend: Zwar wurde die Effizienz fossiler Kraftwerke gesteigert; auch sind erneuerbare Energiequellen stärker genutzt worden. Dennoch ist es nicht gelungen, den CO_2-Ausstoß stärker zu reduzieren.

In dieser Situation wollte die Bundesregierung weitergehen und den Kohlendioxid-Ausstoß noch stärker reduzieren. So beschloss sie im »Nationalen Klimaschutzprogramm« vom Oktober 2000 als Ziel, die Kohlendioxid-Emission schon bis zum Jahr 2005 um 25 Prozent zu vermindern. Diese Marke wurde jedoch nicht erreicht (siehe Grafik rechts). Mit dem neuen Acht-Punkte-Plan von 2007 hat sich der Bundesumweltminister nun sogar eine Minderung der Emissionen auf 610 Millionen Tonnen im Jahr 2020 auf die Fahne geschrieben, also um insgesamt 40 Prozent bezogen auf 1990. Angesichts dieser Zahlen



In den letzten 15 Jahren reduzierte sich der Ausstoß an Kohlendioxid leicht. Wie viel des Treibhausgases Deutschland künftig emittieren könnte, hat der Autor in drei Szenarien hochgerechnet (blau). Dagegen stehen die ehrgeizigen Ziele der Bundesregierung (»Plan Bundesregierung, rot).

würde die Bundesregierung ihren eigenen Zielen widersprechen, wenn sie an der Laufzeitbegrenzung für die deutschen Kernkraftwerke festhalten will, zu der die Vorgängerregierung im Jahr 2000 die Industrie verpflichtet hat. Zum besseren Verständnis möchte ich einige Fakten und Folgerungen darlegen.

80 000 neue Windräder?

Werden die Kernkraftwerke wie geplant abgeschaltet, entsteht bis 2020 in der Stromerzeugung eine Lücke von gut 26 Prozent. Sie ließe sich auch nicht durch regenerative Energien oder Einsparung ersetzen: Das geht aus dem bisherigen Ausbau der Kraftwerksanlagen mit Wind- und Sonnenenergie sowie Biomasse hervor. In dem Zeitraum von 1990 bis 2006 wurden durch den Neubau solcher Anlagen etwa acht Prozent mehr Strom erzeugt. In den zwölf Jahren bis 2020 wird es sicher nicht möglich sein, für die vierfache Menge dieser Anlagen – und mindestens so viele wären für die ehrgeizigen Ziele der Bundesregierung nötig – geeignete Standorte zu finden, sie zu finanzieren und aufzubauen.

Es würde sich etwa um 80 000 neue Windräder handeln, die dann allerdings nicht die Grundlast unserer Stromversorgung tragen könnten. Außerdem gibt es im Binnenland einfach nicht genügend windreiche Standorte. Denkbar und machbar wäre vielleicht, die Zahl der Windkraftanlagen bis zum Jahr 2020 auf 40 000 zu erhöhen. Dabei müssten die zusätzlichen 20 000 Anlagen mit der bisher noch nicht ausgereiften Off-Shore-Technik auf See vor der Nordseeküste gebaut werden. Für diese technische Entwicklung, die bürokratische Genehmigung und den Aufbau mit Seekabeln und Hochspannungsleitungen an Land würden schätzungsweise zehn Jahre benötigt. Daher fordern auch Hersteller von Windkraftanlagen, die Kernkraftwerke noch mindestens zehn Jahre länger laufen zu lassen, damit die Off-Shore-Technik bis dahin ausreifen kann. Andernfalls werde der Neubau von Kohlekraftwerken an der Windkraft vorbeigehen und die Dominanz der fossilen Kraftwerke auf lange Zeit festschreiben. »Die Verlangsamung des Ausstiegs hilft den erneuerbaren Energien«, meint Fritz Varenholt, ein prominenter Vertreter der Windkraftbranche.

Der Bundesumweltminister wirbt für den Neubau von Kohlekraftwerken und die »bessere Ausstattung der Wirtschaft mit Emissionszertifikaten«. Das bedeutet mehr kostenlose Verschmutzungsrechte für Kohlendioxid, eine Steigerung des CO_2- Ausstoßes und eine Schädigung der Umwelt. Die Kraftwerksindustrie plant den Bau von 33 neuen Kohlekraftwerken mit 33 Gigawatt Leistung und jährlichen Kohlendioxid-Emissionen von 160 Millionen Tonnen. Würde man heute die Kernkraftwerke durch fossil befeuerte Kohlekraftwerke mit den höchsten erreichbaren Wirkungsgraden ersetzen, würden die jähr-

lichen CO_2-Emissionen entsprechend ansteigen anstatt abzunehmen. Das würde die deutschen Klimaschutzziele innerhalb der EU und des Kioto-Vertrages eklatant verletzen.

Deshalb wird verschiedentlich versucht, das erzeugte Kohlendioxid abzuscheiden und in unterirdische Endlager zu bringen, anstatt es in die Atmosphäre zu entlassen. In einem Verfahren soll das Kohlendioxid bereits im Kraftwerk durch eine chemische Reaktion aus dem Rauchgas entfernt, komprimiert und danach unterirdisch oder im Meer endgelagert werden.

Täglich müssten 300 Güterzüge mit Kohlendioxid durchs Land rollen

Alle diese Prozesse haben den Nachteil, dass sowohl die Abscheidung des Kohlendioxids wie auch die anschließende Verdichtung vor dem Transport mit Schiff, Bahn oder über eine Pipeline beträchtliche Mengen Energie erfordern. Für die CO_2-Abscheidung wird etwa ein Drittel des vom Brennstoff erzeugten Stroms verbraucht, was den effektiven Wirkungsgrad des Kraftwerks erniedrigt. Um also die gleiche elektrische Energie zu erzeugen, muss primär eine um rund 30 Prozent größere Menge an fossilen Brennstoffen eingesetzt werden. Schließlich müssen die vermehrten Rückstände an Kohlendioxid sicher und dauerhaft in der Erde »endgelagert« werden.

Der Plan der Endlagerung des Kohlendioxids im Meer wird wegen der unabsehbaren Folgen für die Biosphäre nicht ernsthaft verfolgt. Aussichtsreicher scheint da im Prinzip, die riesigen Mengen an Kohlendioxid unter 70-fachem Atmosphärendruck in frühere Lagerstätten ausgebeuteter Öl- oder Gasvorkommen hineinzupressen.

Um welche Mengen geht es und wie sähe der Transport aus? Die vorhandenen deutschen Kohlekraftwerke emittieren im Jahr etwa 300 Millionen Tonnen CO_2. Will man diese durch Kraftwerke mit Kohlendioxidabscheidung ersetzen, so muss man mehr Kohle verbrennen. Die neuen Kraftwerke produzieren dann etwa 400 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr. Die müsste man abscheiden, transportieren und sicher endlagern. Es gälte also pro Tag eine Million Tonnen CO_2 von den Kraftwerken zu den Lagerstätten zu transportieren. Das erfordert täglich 300 Güterzüge oder alternativ den Neubau von 20 Pipelines. Aber wohin sollten diese Züge alle fahren? Zuerst müssten die Lagerstätten ausgebaut werden, die das Treibhausgas aufnehmen sollen. Während der Bauzeit wäre zudem eine Zwischenlagerung nötig. Nach Fertigstellung der Endlager in Deutschland wären diese in wenigen Jahren gefüllt. Dort müsste das Gas für Millionen Jahre so sicher gelagert sein, dass ein Entweichen ausgeschlossen werden kann. Solche Konzepte erscheinen zumindest nicht ausgereift.

Eine größere Speicherkapazität würden so genannte Salzwasseraquifere bieten. Solche porösen Schichten, die Wasser führen, finden sich zum Beispiel unter dem Nordseeboden in einer Tiefe von tausend Metern. Dort müsste eine große technische Infrastruktur aufgebaut werden, um täglich eine Million Tonnen CO_2-Abfall sicher zu verarbeiten. Die Frage ist unbeantwortet, wie das geschehen soll. Wie sollen in Deutschland oder im küstennahen Nordseeboden 400 Millionen Tonnen flüssiges oder gasförmiges Kohlendioxid pro Jahr sicher im Boden endgelagert werden, wenn schon die Lagerung eines Tausendstels dieses Volumens von festen Uranrückständen Schwierigkeiten bereitet? Die Entwicklung

Energie in Deutschland

▶ Zurzeit beruht die Stromerzeugung in Deutschland auf den drei großen Säulen: Braunkohle, Steinkohle und Kernkraft (siehe Grafik rechts). Die 17 deutschen Kernkraftwerke erzeugen 26,6 Prozent der elektrischen Energie vor der Braunkohle mit 23,4 Prozent.

▶ Wenn man den Anteil der elektrischen Leistung betrachtet, der zu jeder Sekunde gleichmäßig benötigt wird, so wird diese Grundlast sogar je zur Hälfte von Braunkohle und Kernkraft getragen.

▶ Die erneuerbaren Energien haben im letzten Jahrzehnt ihren Anteil von vier Prozent aus der Wasserkraft auf etwa zwölf Prozent im Jahr 2006 gesteigert. Der **Zuwachs von acht Prozent** teilt sich auf in 5,1 Prozent aus Windkraft, 3 Prozent aus Biomasse und 0,33 Prozent aus Fotovoltaik.

▶ Dieser Zuwachs wurde erreicht durch Investitionen in Milliardenhöhe und durch verdeckte Subventionen über garantierte **Vergütung für die Einspeisung**. Die Vergütungen stiegen von 2,2 Milliarden Euro im Jahr 2002 auf 4,95 Milliarden in 2006 an, davon 2,37 Milliarden für Windstrom, 1,038 Milliarden für Strom aus Biomasse und 0,983 Milliarden für Fotovoltaikstrom.

▶ Für den ins Netz gespeisten Strom aus Windkraft und Fotovoltaik erhalten die Betreiber Preise von etwa 7,5 Cent/Kilowattstunde beziehungsweise 50 Cent/Kilowattstunde.

▶ Demgegenüber betragen die Erzeugungskosten aus Kohle- und Kernkraftwerken 3 bis 5 Cent/Kilowattstunde. Die Verbraucher finanzieren die Subvention über den erhöhten Strompreis.

dieser Technik, an der manche Kraftwerksunternehmen arbeiten, wird noch ein bis zwei Jahrzehnte dauern.

Im Rheinland oder in Westfalen ist bis 2014 eine Versuchsanlage geplant. In der Nähe von Cottbus baut bereits der Energiekonzern Vattenfall: Beim Kraftwerk Schwarze Pumpe entsteht eine kleine Testanlage mit drei Prozent der Leistung eines normalen Braunkohlekraftwerks und einem Wirkungsgrad von 34 Prozent. Das dabei abgeschiedene Kohlendioxid soll dann im Boden endgelagert werden. Bei einer Probebohrung sollen 70 000 Tonnen CO_2 unter 70-fachem Atmosphärendruck in eine 700 Meter tiefe Schicht gepumpt werden.

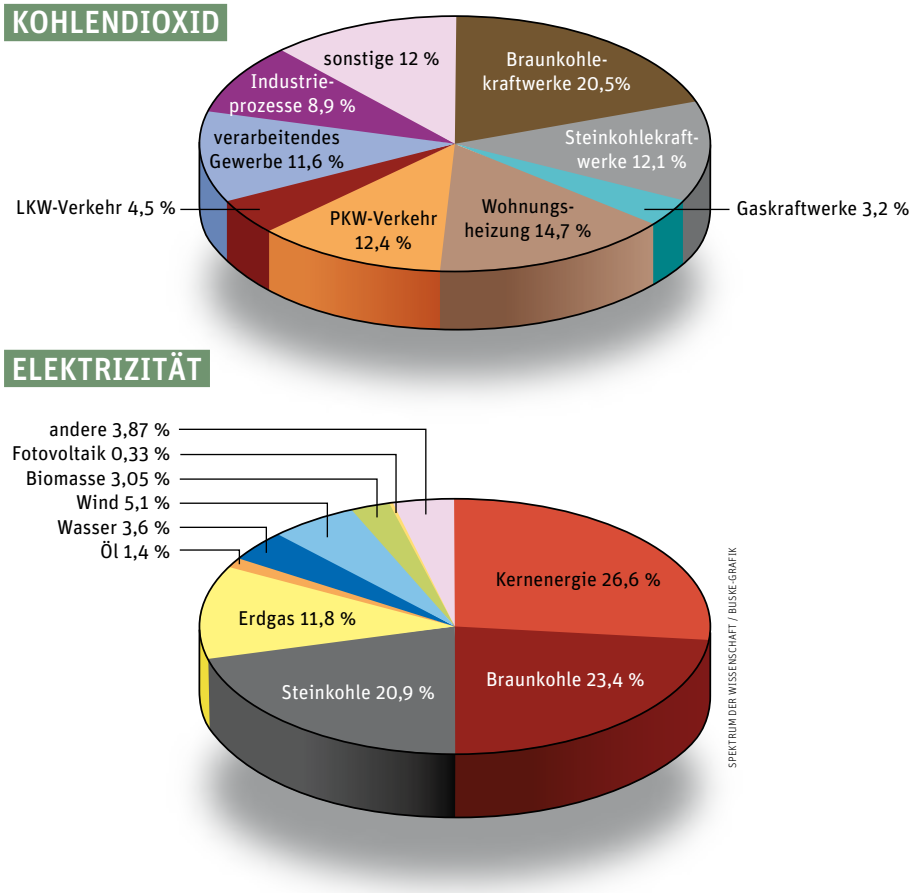
Genügend zeitliche Reichweite

Für den späteren Jahresbedarf wären in Deutschland 5000 solche Lagerstätten nötig. Die Endlagerung birgt jedoch Risiken. Denn es ist unklar, ob die Milliarden Tonnen des endgelagerten Kohlendioxidgases nicht doch mit der Zeit in die Atmosphäre diffundieren können. Auch sind die Kosten der Endlagerung enorm, und, wie gesagt, die technischen Probleme weit gehend ungelöst. Ein »CO_2-freies Kohlekraftwerk« gibt es jedenfalls zurzeit nur in der Werbung der Stromkonzerne.

Wenn die Abscheidetechnik überhaupt für große Kraftwerke eingesetzt wird, dann dürfte sie nach heutiger Kenntnis erst ab dem Jahr 2020 eine Rolle spielen. Für die Erreichung der Klimaziele bis 2020 kann sie noch kaum einen Beitrag leisten. Kernkraftwerke und mögliche Fusionsreaktoren dagegen beruhen auf der Umwandlung von Masse in Energie, nicht auf der chemischen Verbrennung von Kohlenstoff. Sie entlassen beim Betrieb kein Kohlendioxid in die Atmosphäre, sie sind kohlendioxidfreie Kraftwerke.

Wie steht es mit der Zukunft der Kernkraft? Die Versorgung mit Uran ist nach Angaben im Rotbuch der IAEA in Wien für lange Zeit gesichert. Die zu einem heutigen Preis von 130 Dollar pro Kilogramm Uran abbaubaren Vorräte beliefen sich demnach im Jahr 2004 auf 4,6 Millionen Tonnen. Im selben Jahr wurden weltweit 40 700 Tonnen abgebaut. Hinzu kommen Vorräte aus militärischer Lagerhalterung, die wegen der Abrüstung nicht mehr benötigt werden. Die »zeitliche Reichweite« wird, bei konstantem Verbrauch, auf mehr als 80 Jahre geschätzt. Derzeit sind 30 neue Kernkraftwerke im Bau. Wegen dieser Renaissance der Kernkraft in der Welt stiegen die Uranpreise im Jahr 2005 um 50 Prozent. So können die Minengesellschaften durch die höheren Einnahmen weitere, noch unerschlossene Vorräte wirtschaftlich sinnvoll abbauen, neue Lagerstätten suchen und stillgelegte Minen reaktivieren. Die zeitliche Reichweite wird dadurch wieder angehoben. Auf den Strompreis aus Kernkraftwerken hat die Preissteigerung des Urans nur wenig Einfluss, da das nukleare Brennmaterial weniger als fünf Prozent zu den Gesamtkosten beiträgt. Ein Einstieg in die Brütertechnologie erscheint aus dieser Sicht unnötig, auch schlägt das niemand vor.

Für die mittelfristige Entwicklung in Deutschland bis zum Jahr 2020 sehe ich – analog zur DPG-Studie – vor allem drei Möglichkeiten, die üblicherweise als »Szenarien« bezeichnet werden:



Unter allen Kohlendioxidquellen in Deutschland dominieren Braunkohlekraftwerke sowie die Wohnungsheizung (oben). An der Stromerzeugung waren die erneuerbaren Quellen 2006 bisher nur mit zwölf Prozent beteiligt (unten).

Szenario A:

▶ Die erneuerbaren Energien werden weiter gefördert. Der Anteil der Windkraft an der Stromerzeugung wird von fünf Prozent auf zwölf Prozent erhöht mit Investitionen von 40 Milliarden Euro. Der Anteil der Fotovoltaik wird von 0,33 Prozent auf 0,66 Prozent verdoppelt.

▶ Der Strom aus erneuerbaren Energien ersetzt zu einem geringen Teil den Strom aus alten Kohlekraftwerken. Die anderen alten Kohlekraftwerke mit niedrigem Wirkungsgrad werden Zug um Zug durch neue effizientere ersetzt, der Anteil der Gaskraftwerke

verdoppelt. Durch die Verringerung des Anteils der fossilen Kohlekraftwerke und durch die Effizienzsteigerung wird die jährliche Emission der fossilen Kraftwerke um 20 bis 30 Millionen Tonnen vermindert.

▶ Die Kernkraftwerke laufen weiter und decken ein Drittel des Strombedarfs. Aus einer Abgabe der Betreiber für die verlängerte Laufzeit werden die energetischen Erneuerung der Wohngebäude und ein Teil der Investitionen in erneuerbare Energien finanziert.

▶ Dazu bietet der Staat verstärkte steuerliche Anreize und verschärft die Bauvorschriften über die Wärmedämmung der Wohngebäude. Durch die Verbesserung der Effizienz der Motoren und den vermehrten Einsatz von Biodiesel und Methanol werden die Emissionen des Verkehrs um 20 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr vermindert.

Konsequenz: Mit diesem Bündel von Maßnahmen könnte die jährliche deutsche Kohlendioxid-Emission bis 2020 um 50 bis 60 Millionen Tonnen niedriger sein als heute. Das Kioto-Ziel und die deutschen Zusagen gegenüber der EU würden erreicht. Nach 20 Jahren Gebäudesanierung käme eine zusätzliche Emissionsminderung um jährlich 70 Millionen Tonnen hinzu. International könnte Deutschland damit politisch weiter als Vertreter des Klimaschutzes auftreten und wirtschaftlich mit dem Export von Windkraftanlagen, Solaranlagen und Kraftwerkstechnik, Turbinen sowie von Kerntechnik zur Entwicklung in Asien beitragen.

Szenario B:

▶ Der Ausbau der erneuerbaren Energien wird wie bei Szenario A gefördert. Die Atomkraftwerke werden nach und nach abgeschaltet. Die jährliche Versorgungslücke von 168 Milliarden Kilowattstunden wird zu einem Viertel durch erneuerbare Energien gedeckt.

▶ Der überwiegende Teil des Fehlbedarfs wird ersetzt durch Stromimporte aus Frankreich, Polen, Tschechien und der Schweiz. Die Nachbarn bauen zu diesem Zweck mit eigenem oder deutschem Kapital zusätzliche Kernkraftwerke – Frankreich in Cattenom an der Mosel und Fessenheim am Rhein.

▶ Die Kohlekraftwerke laufen weiter beziehungsweise werden zum Teil durch effizientere ersetzt. Die Emissionsminderung beim Verkehr gleicht derjenigen beim Szenario A.

▶ Die Emissionsminderung durch Gebäudesanierung fällt weg, da sie nicht in diesem Umfang zu finanzieren ist. In diesem Fall ist die Minderung der deutschen Emissionen weniger groß als im Fall A.

Konsequenz: Eine Reduktion um 40 Millionen Tonnen pro Jahr wäre damit denkbar. Die Ziele des Klimaschutzes im Rahmen der EU und des Acht-Punkte-Plans des BMU könnten mit diesen Maßnahmen jedoch nicht erreicht werden.

Szenario C:

▶ Die Versorgungslücke durch das vorzeitige Abschalten der Kernkraftwerke wird durch den Neubau fossiler Kohle- und Gaskraftwerke gedeckt.

▶ Die Energiekonzerne planen als kostengünstigste Art der Stromerzeugung 33 neue Braunkohle- und Steinkohlekraftwerke mit einer Gesamtleistung von 33 Gigawatt, in die sie bis zum Jahr 2012 mehr als 40 Milliarden Euro investieren.

▶ Der Anteil fossiler Kraftwerke an der Stromerzeugung steigt auf etwa 80 Prozent.

Konsequenz: Der Kohlendioxidausstoß würde dadurch um 160 Millionen Tonnen pro Jahr anwachsen. Dieser Anstieg könnte durch die Klimaschutzmaßnahmen höchstens zu einem Drittel kompensiert werden. Deutschland würde seine Emissionen steigern und bliebe der größte Kohlendioxid-Emittent Europas, sowohl beim absoluten Betrag als auch bezogen auf die Emissionen pro Einwohner.

Welche Schlussfolgerungen sind zu ziehen? Die Klimaziele der Bundesregierung für 2020 können nur mit einer Verlängerung der Laufzeiten der Kernkraftwerke erreicht werden. Die Kernenergie dient somit als Brückentechnologie zur Erreichung dieser Ziele.

Der eigentlich nötigen Reduzierung des Kohleeinsatzes stehen sowohl politische Interessen als auch wirtschaftliche Interessen der Kohleindustrie sowie der Betreiber fossiler Kraftwerke entgegen. Für sie hat Verstromung der heimischen Braunkohle und der importierten Steinkohle Vorrang vor Klimaschutz. Wenn Deutschland aber nicht bald den Ausstiegsbeschluss aus der Kernenergie revidiert, wird das Land seine Stellung als größter Klimaverschmutzer Europas ausbauen und zum Schlusslicht in der Klimapolitik werden. Es verliert seine klimapolitische Glaubwürdigkeit und untergräbt die internationalen Bemühungen, andere große Emittenten von Kohlendioxid in den Kioto-Vertrag einzubinden.

Für die nächsten 50 Jahre, die über die Entwicklung des Erdklimas entscheiden werden, können wir ebenso wie die meisten anderen Industrienationen auf Kernenergie nicht verzichten, ohne das Klima unumkehrbar zu schädigen. Auf erneuerbare Energien als dominante Energiequelle (oder gar die Kernfusion) richten sich unsere Hoffnungen frühestens für die Zeit nach 2050. ◁

Konrad Kleinknecht, Jahrgang 1940, stammt aus Ravensburg. Er studierte Physik in München und Heidelberg, wo er 1966 promovierte und 1971 auch habilitierte. 1972 wurde er an die Universität Dortmund berufen, wo er die Fachrichtung Teilchenphysik aufbaute. 1985 wechselte er an die Universität Mainz. Kleinknecht forschte über die Schwache Wechselwirkung, Neutrinophysik sowie die Verletzung der Materie-Antimaterie-Symmetrie. 1990 erhielt er den Leibnizpreis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Seit 1995 arbeitet er auch an Fragen der Energieversorgung und deren Zusammenhang mit dem Klimawandel. Seit 2000 ist er Klimabeauftragter der DPG.

Wer im Treibhaus sitzt – wie wir der Klima- und Energiefalle entkommen. Von Konrad Kleinknecht. Piper Verlag, München, 2. Auflage, 2007

Der Klimawandel. Von Stefan Rahmstorf und Hans Joachim Schellnhuber. C.H.Beck Verlag, München 2006

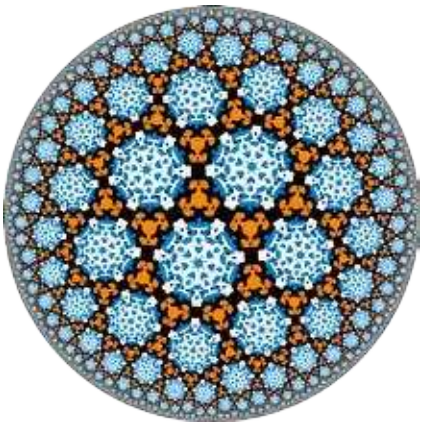
Klimaschutz und Energieversorgung 1990 – 2020. Von W. Blum et al. Deutsche Physikalische Gesellschaft. Bad Honnef 2005

Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover 2004

Die Energiefrage. Von Klaus Heinloth, Vieweg Verlag. Braunschweig, 2. Auflage, 2003

Klimatologie. Von Christian-Dietrich Schönwiese. UTB Verlag, Stuttgart, 2. Auflage, 2003

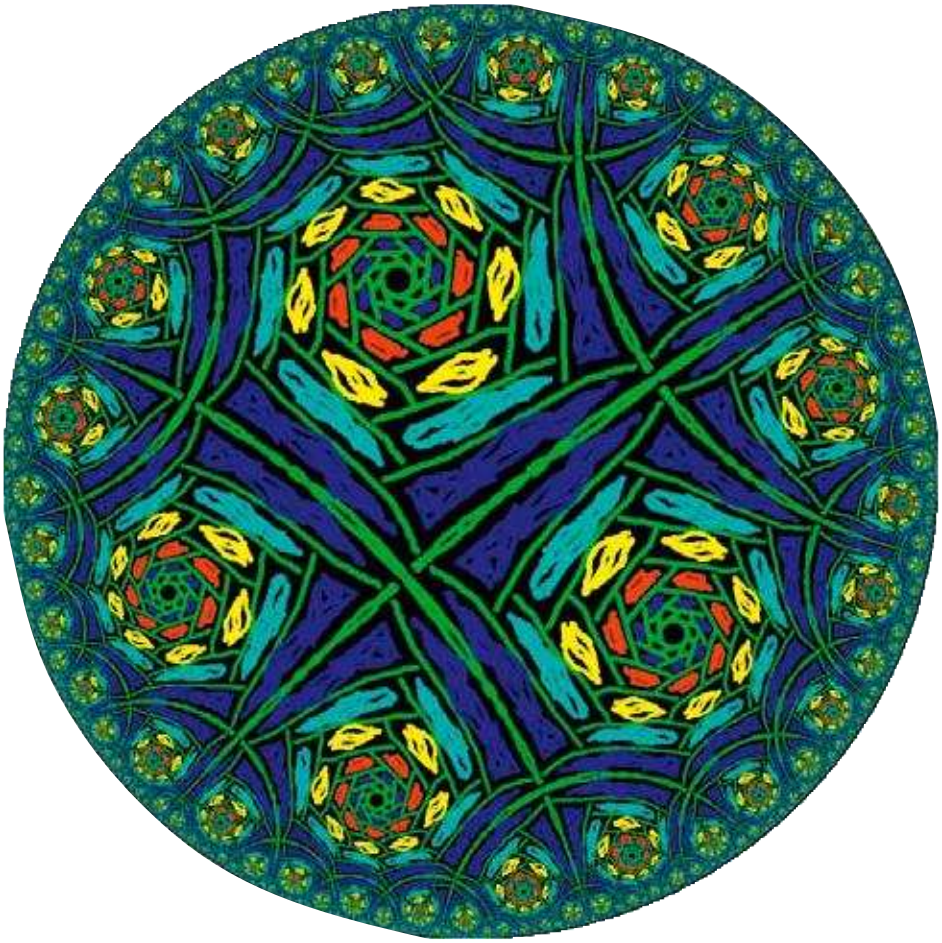
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/943421.

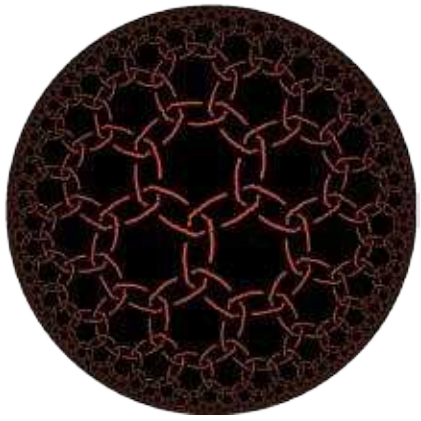


VISUALISIERUNG

Das Ausgedachte in Sichtbares umgerechnet

Imaginäres in Reales umgewandelt: Die Ausstellung »Imaginary 2008« versammelt Mathematik-Visualisierungen aus aller Welt.





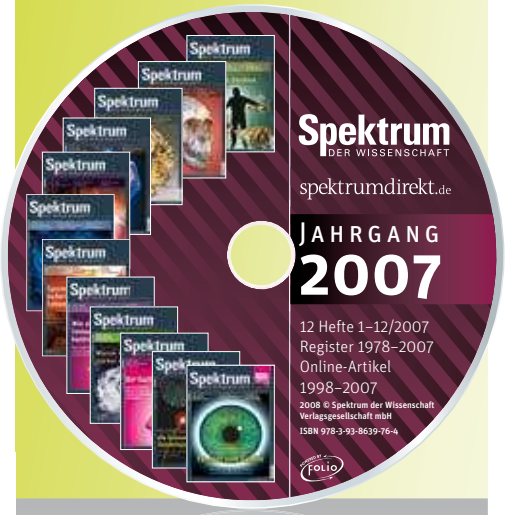
MARTIN VON GAGERN

Einige Kostproben aus Martin von Gagerns Software zur Pflasterung der hyperbolischen Ebene: Im Bild oben Mitte sind Dreiecke gleich gefärbt, wenn sie durch gewisse elementare Transformationen aufeinander abgebildet werden; mit Hilfe dieser Transformationen füllt das Programm die Fläche mit Repliken eines »Urmusters«. In den übrigen Bildern hat der Benutzer das Urmuster mit der Maus gezeichnet.

Von Christoph Pöppe

Eine Polynomgleichung wie zum Beispiel $x^5 - 4x^3 - x^2 + 1 = 0$ ist nicht einfach durch Anwendung einer Formel zu lösen. Die Mitternachtsformel aus der Schule – mit p, q und der Wurzel – hilft nur, wenn der Grad des Polynoms, das heißt die höchste vorkommende Potenz von x, gleich 2 ist (»quadratische Gleichung«). Die entsprechende Formel für den Grad 3 ist schon sehr umfangreich, für den Grad 4 ist sie geradezu monströs, und für Gleichungen fünften und höheren Grades gibt es gar keine geschlossene Formel mehr. Da hilft nichts als schnöde Numerik: Ist es erst einmal gelungen, die Nullstelle des Polynoms von beiden Seiten in die Zange zu nehmen, dann ist es nicht mehr schwer, sie auf so

Ein starker Jahrgang ...



... ist die CD-ROM 2007 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

viele Dezimalstellen zu bestimmen, wie man braucht.

Für Polynome in drei Variablen x, y und z ist die Situation nicht grundsätzlich besser. Im Allgemeinen gibt es nicht nur wenige isolierte Lösungen, sondern ein ganzes Kontinuum. Alle Punkte (x, y, z) im Raum, die eine Gleichung wie $x^2z^2+z^4-y^2-z^3=0$ erfüllen, bilden eine Fläche. Aber wieder gibt es kein allgemeines, formelmäßig beschreibbares Verfahren, die Punkte dieser Fläche zu finden. Um sie darzustellen, muss der Computer ziemlich viele Punkte durchprobieren. Entsprechend ist der Gleichung nicht ohne Weiteres anzusehen, wo die Fläche sich selbst durchdringt oder wo sie so genannte Singularitäten wie Spitzen oder scharfe Kanten hat.

Hat man jedoch einen Punkt der Fläche gefunden, dann ist es kein Problem auszurechnen, wie die Fläche in einer kleinen Umgebung dieses Punkts aussieht. Immerhin sind Polynome differenzierbare Funktionen; diese Eigenschaft verschafft einem zwar nicht unbedingt einen Punkt der Fläche, aber zu einem gefundenen Punkt die Tangentialebene an die Fläche in diesem Punkt – es sei denn, der Punkt wäre eine Singularität. Wenn nun die Fläche aus einem spiegelnden Material wäre, dann würde ein Lichtstrahl, der auf einen Punkt der Fläche auftrifft, so reflektiert, als läge in diesem Punkt statt der echten Fläche die Tangentialebene. (Die ist natürlich in jedem Punkt eine andere.)

Damit sind algebraische Flächen – so heißen die Nullstellenmengen von Polynomen – dankbare Objekte für die Visualisierung mit dem Computer. In den gedachten Raum, in dem die Fläche lebt, setze man ein paar geeignete Lichtquellen und berechne, welchen Anteil dieses Lichts jeder sichtbare Punkt der Fläche ins Auge des Betrachters wirft. Dabei unterstellt man in der Regel, dass die Fläche das Licht nicht nur spiegelnd reflektiert, sondern auch diffus streut. Sie wirft das Licht also nicht nur in der Richtung zurück, die der Regel »Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel« entspricht, sondern auch in abweichenden Richtungen – je größer die Abweichung, desto weniger.

Eistüte und Dingdong mit spiegelndem Glanz

Alle Computerspiele arbeiten mit derartigen Beleuchtungsmodellen. Aber algebraische Flächen werden bei geschickter Programmierung viel schöner als die virtuellen Helden samt Drachen und zugehörigem Inventar; denn deren Oberflächen werden aus lauter kleinen Dreiecken mit jeweils einheitlichen Reflexionseigenschaften zusammengesetzt, und da sind sichtbare Brüche an den Dreieckskanten nicht immer vermeidbar.

Herwig Hauser, Professor für Mathematik an den Universitäten Wien und Innsbruck, hat mit seinem Team die Kunst der Visualisierung algebraischer Flächen zu großen Höhen getrieben. Be-

Mit dieser »Kollektion« aus Flächen gewannen Richard Palais und Luc Benard den »Visualization Challenge 2006« der Zeitschrift »Science«.

RICHARD PALAIS UND LUC BENARD

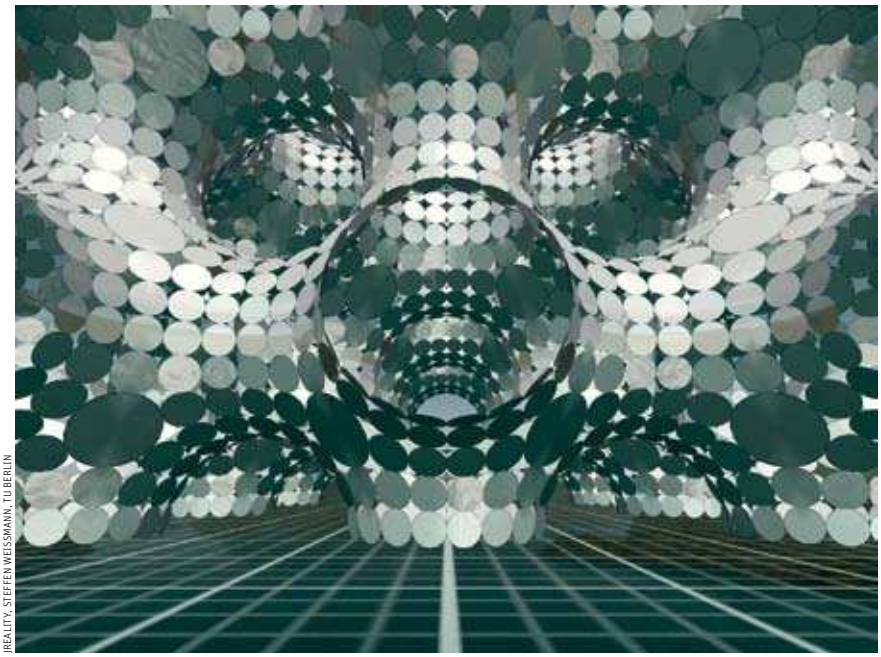
sucher des Internationalen Mathematik-Kongresses in Madrid 2006 konnten sich an einem Sortiment kunstvoll ausgearbeiteter Flächenbilder erfreuen. Die Fläche, welche die Deutsche Mathematiker-Vereinigung dem Schriftsteller Hans Magnus Enzensberger widmete (Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 114), stammt im Konzept ebenfalls aus Hausers Werkstatt.

Gert-Martin Greuel, Direktor des Mathematischen Forschungsinstituts Oberwolfach und als Professor an der Universität Kaiserslautern selbst in der Singularitätenforschung aktiv, griff die Ausstellung in Madrid auf, um zum Jahr der Mathematik 2008 eine Ausstellung mit den »international besten Mathematik-Visualisierungen« zu konzipieren und auf die Deutschland-Rundreise zu schicken. »Oberwolfach«, das ist jenes Institut im Schwarzwald mit den paradiesischen Arbeitsmöglichkeiten, wo sich jede Woche eine andere Gruppe von Mathematikern zu einer Tagung zusammenfindet – darunter auch Visualisierer wie Ulrich Pinkall aus Berlin und Richard Palais aus Irvine (Kalifornien), der vor zehn Jahren emeritiert und immer noch aktiv ist.

Palais und seine Arbeitsgruppe entwickeln das Visualisierungsprogramm »3D-XplorMath« – so erfolgreich, dass Palais gemeinsam mit dem Künstler Luc Benard den Visualisierungswettbewerb der Zeitschrift »Science« gewann (Bild links unten). Bei seiner Vergangenheit verwundert es nicht, dass er ästhetischen Reiz in merkwürdig gekrümmten Flächen sucht (und findet), für die nur eine ziemlich kleine Gruppe von Mathematikern professionelles Interesse aufbringt.

Ein weiterer prominenter Mathematik-Künstler ist Jos Leys, den ich Ihnen vor gut einem Jahr an dieser Stelle vorgestellt habe (Spektrum der Wissenschaft 2/2007, S. 105).

Warum soll man überhaupt die Ausstellung besuchen, statt sich die Bilder bequem im Internet anzusehen? Nun ja, auf großen Ausstellungstafeln wirken die algebraischen Flächen schon deutlich eindrucksvoller. Einige Objekte sind sogar in leibhaftigem Kunststoff zu besichtigen; die Technik der computergesteuerten Stereolithografie hat große Fortschritte gemacht. Aber die wesentliche Stärke der Ausstellung liegt in den interaktiven Möglichkeiten. Mit Hilfe des Programms »jreality«, das von einer Gruppe an der Technischen Universität Berlin entwickelt wird, fliegt der Benutzer durch eine imaginäre Landschaft und besichtigt von allen Seiten so merkwürdige Dinge wie eine Boy'sche Minimalfläche oder die dreifach periodisch fortsetzbare Minimalfläche mit der Symmetrie des Würfels; nur ist diese Fläche nicht durchgehend dargestellt, sondern aus Kreisscheiben unterschiedlicher Größe zusammengesetzt (Bild oben).



JREALITY, STEFFEN WEISSMANN, TU BERLIN

Eine dreifach periodische Minimalfläche mit der Symmetrie des Würfels wird hier durch Kreisscheiben approximiert.

Darüber hinaus kann der Besucher gestalterisch tätig werden. Ornamente zeichnen sich dadurch aus, dass ein und dasselbe Bildelement verschoben, gedreht und/oder gespiegelt immer wieder auf der Bildfläche vorkommt – im Prinzip unendlich oft. Es gibt genau 17 wesentlich verschiedene Weisen (die 17 »kristallografischen Gruppen«), Verschiebungen, Drehungen und Spiegelungen so zu kombinieren, dass die Bilder eines »Urmusters« lückenlos zusammenpassen, ohne sich zu überlappen. Ein Programm des Studenten Martin von Gagern übernimmt den technischen Teil: die Replikation des Urmusters. Der künstlerische Teil, nämlich das Urmuster selbst mit der Maus zu zeichnen, bleibt dem Besucher überlassen (Bild S. 65).

Neuerdings hat Martin von Gagern sein Programm auf die hyperbolische Geometrie erweitert, jene merkwürdige nichteuklidische Welt, in der die Winkelsumme im Dreieck stets kleiner ist als 180 Grad und die man daher zum Bei-

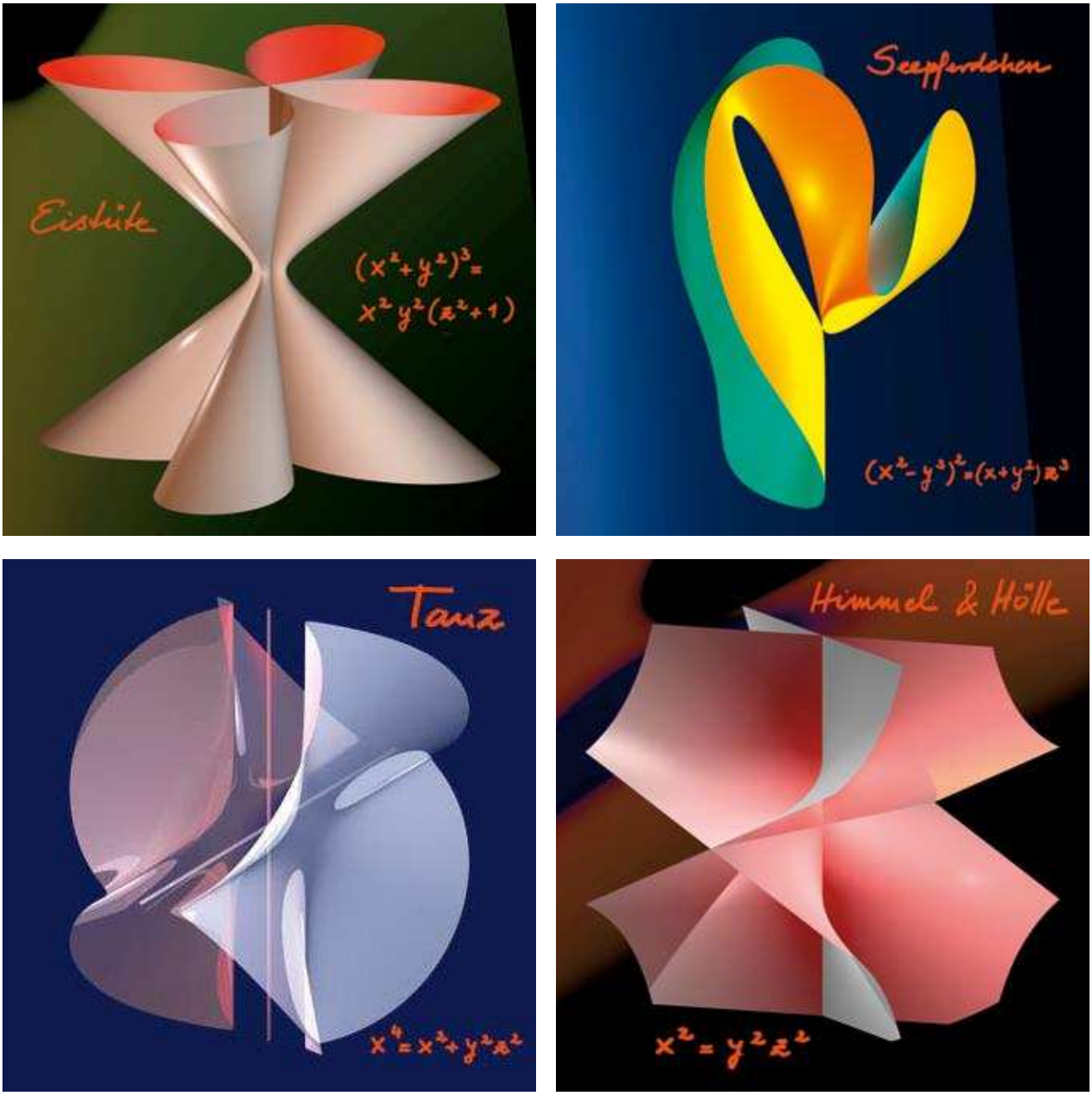
Imaginary 2008

Nach bisheriger Planung ist die Ausstellung

- vom 10. März bis 11. April im Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Kaiserslautern,
- vom 16. bis 25. Mai im Ideenpark 2008 der ThyssenKrupp AG in der Neuen Messe Stuttgart,
- vom 29. Mai bis 25. Juni in den Bahnhofsgalerien, Potsdam, und
- im Rahmen des Wissenschaftssommers vom 28. Juni bis 4. Juli in Leipzig

zu sehen. Darüber hinaus fährt das Wissenschaftsschiff der Leibniz-Gemeinschaft in diesem Jahr durch ungefähr zwanzig Städte in Deutschland und wird einen Teil von Imaginary präsentieren. Weitere Ausstellungstermine in Kassel (August), Köln (September), Konstanz und München (Oktober), Saarbrücken (Oktober / November) und Mainz (November / Dezember) sind geplant und werden auf der Webseite bekanntgegeben. Der Eintritt ist frei.

www.imaginary2008.de



Im Atelier von Herwig Hauser entstehen algebraische Flächen mit den exotischsten Formen.

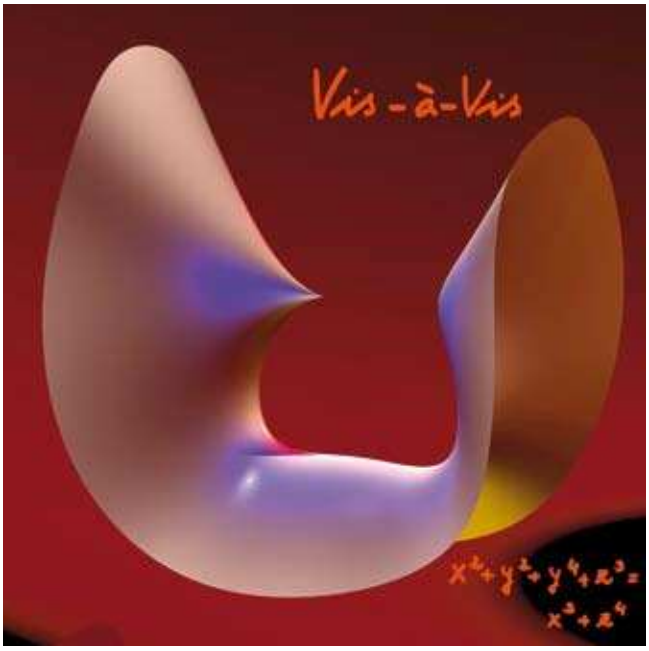
spiel mit rechtwinkligen Fünfecken lückenlos pflastern kann – jawohl, Fünfecke mit fünf rechten Winkeln (Spektrum der Wissenschaft 10/1990, S. 12). Das Problem war so schwierig und von Gagerns Lösung so genial, dass die ursprünglich vorgesehene Diplomarbeit unversehens zur Dissertation geriet.

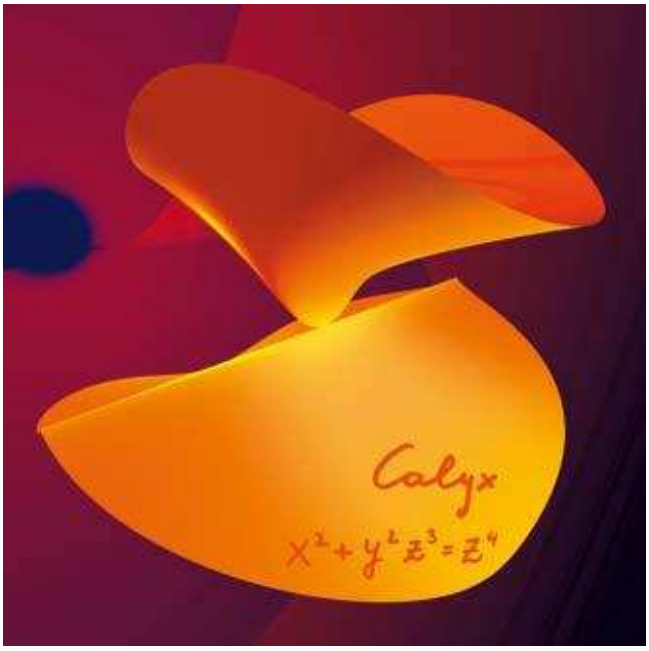
Schließlich kann man sich auch selbst an den algebraischen Flächen versuchen, deren edle Formen Herwig Hauser so trefflich ins Bild zu setzen weiß. Auf einer virtuellen Tastatur gibt man die Formel ein, und schon springt die Fläche auf den Bildschirm und ist nach Belieben von allen Seiten betrachtbar.

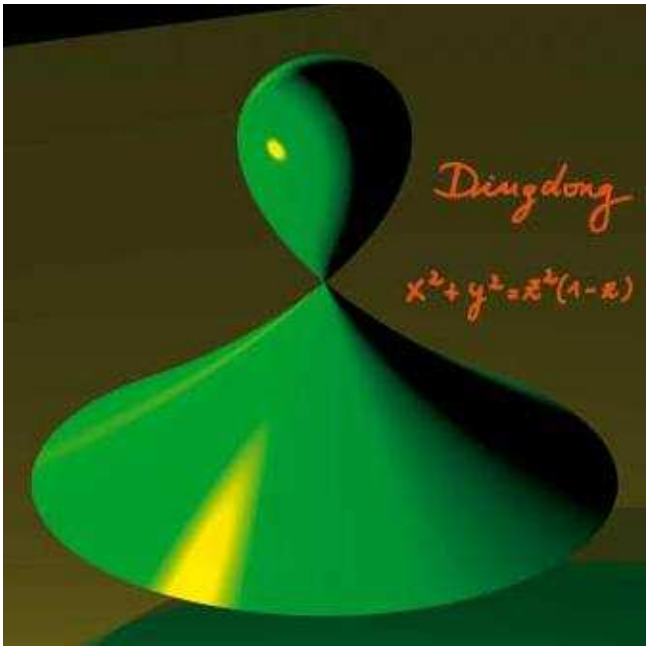
Die Formel darf zwei Parameter namens *a* und *b* enthalten; deren Wert kann der Benutzer mit einem virtuellen Schieberegler zwischen 0 und 1 variieren, wobei sich die Fläche entsprechend deformiert. Mit weiteren Regelknöpfen kann man die Fläche im Raum drehen. Von dem Gesamtobjekt, das sich bis ins Unendliche erstrecken kann, zeigt das Programm nur den Teil, der sich innerhalb einer Kugel um den Nullpunkt befindet; der Radius ist ebenfalls durch einen Mausklick einstellbar.

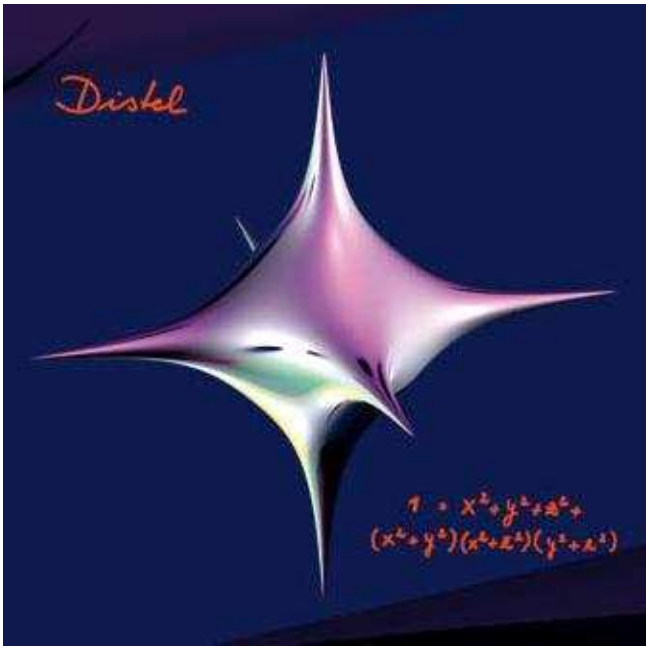
Einige Beispiele, von denen aus man herumprobieren kann, sind vorbereitet, und unversehens landet der ahnungslose Spieler am Bildschirm an der vordersten Front der Forschung.

Es ist nämlich noch nicht in jedem Fall bekannt, wie viele Singularitäten eine algebraische Fläche gegebenen Grades höchstens haben kann. Für den Grad 6 hält den Weltrekord die von dem Erlanger Mathematiker Wolf Barth entdeckte Barth'sche Sextik mit 65 Singularitäten und daran ansetzenden Trompetenrohren, die sich in die verschiedensten Raumrichtungen bis ins Unendliche erstrecken. Es ist auch bewiesen, dass mehr Singularitäten beim Grad 6 nicht möglich sind. Für höhere Grade dagegen ist die maximal mögliche Anzahl an Singularitäten









ABBILDUNGEN DIESER DOPPELSEITE: HERWIG HAUSER

Preisausschreiben

Mathematik-Kunst-Wettbewerb

Gemeinsam mit dem Mathematischen Forschungsinstitut Oberwolfach veranstaltet Spektrum der Wissenschaft einen Wettbewerb mit dem Ziel, neue, ansehnliche, überraschende oder sonstwie beeindruckende Bilder und Bildsequenzen aus algebraischen Flächen zu erstellen.

Hilfsmittel ist das Programm »Surfer«, das wir zum Download bereithalten. Um eine algebraische Fläche zu erzeugen, genügt es, deren Formel, ein Polynom in den drei Variablen x, y und z, einzugeben.

Mathematische Vorkenntnisse sind hilfreich, aber nicht Bedingung. Beim Aufruf bietet das Programm »Surfer« eine Auswahl an Beispielflächen samt zugehörigen Formeln an. Verändern Sie zunächst diese Beispielformeln, indem Sie für manche Zahlenwerte geringfügig andere einsetzen, und gewinnen Sie so einen ersten Eindruck von den Möglichkeiten des Programms.

Oder arbeiten Sie sich von elementaren Formen zu komplizierteren vor, zum Beispiel:

▶ $x^2+y^2-1=0$ ist die Gleichung für einen Kreis mit Radius 1 und Mittelpunkt 0 in der Ebene. »Surfer« macht daraus eine ganze Röhre mit kreisförmigem Querschnitt; denn die dritte Koordinate z kommt in der Gleichung nicht vor, also enthält die algebraische Fläche für jeden z-Wert einen Kreis. Eine Kugel (mit Radius 1 und Mittelpunkt 0) hat die Gleichung $x^2+y^2+z^2-1=0$.

▶ Wenn Sie die Variable x überall, wo sie vorkommt, durch cx ersetzen, wobei $c\neq 0$ irgendeine reelle Zahl ist, wird die Fläche in x-Richtung mit dem Faktor $1/c$ gestaucht (oder gedehnt, wenn $c<1$ ist). Ersetzen Sie x durch $x-a$, so wandert die Fläche um a in positiver x-Richtung, das heißt nach rechts. Entsprechendes gilt für die Variablen y und z.

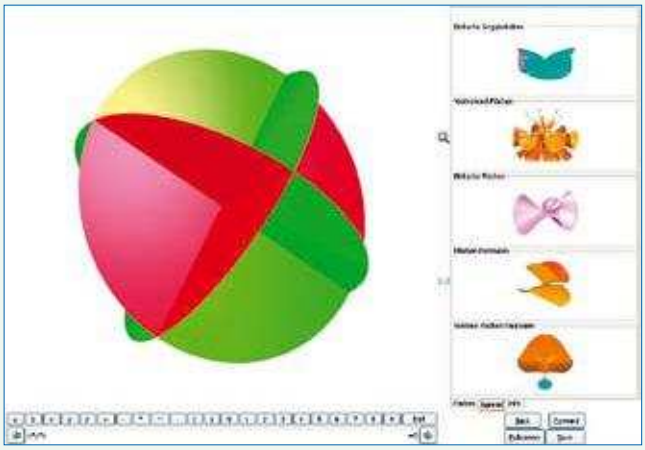
▶ Ein Produkt ist null, wenn einer seiner Faktoren null ist. Das Produkt zweier Formeln zu verschiedenen Flächen ergibt eine Fläche, die aus beiden zusammen besteht. $(x^2+y^2-1)(y^2+z^2-1)(z^2+x^2-1)=0$ erzeugt drei Kreisröhren, die im Nullpunkt senkrecht aufeinander stehen.

▶ Geringfügige Variation der Formel erzeugt eine geringfügig abweichende Fläche. Dabei pflegen besondere Punkte wie Spitzen oder scharfe Kanten »aufzuweichen«.

▶ Wenn in Ihrer Formel nur gerade Potenzen von x vorkommen (x^2, x^4, ..., nicht aber x oder x^3), dann bleibt die zugehörige Fläche unverändert (»invariant«) unter der Ersetzung von x durch $-x$. Das heißt, sie ist spiegelbildlich symmetrisch bezüglich der Ebene $x=0$ (das ist die y-z-Ebene). Indem man sich auf gerade Potenzen von y oder z beschränkt, erreicht man Symmetrie bezüglich Vertauschung von vorn und hinten beziehungsweise unten und oben.

▶ Eine andere Art von Symmetrie erreicht man, wenn die Formel gegen die Vertauschung zweier Variablen invariant ist. Dann ist nämlich die Fläche spiegelsymmetrisch bezüglich einer »schrägen« (um 45 Grad gegen die Koordinatenebenen geneigten) Ebene.

▶ Eine Fläche hat die Symmetrie des Dodekaeders (oder des Ikosaeders, was dasselbe ist), wenn sie gegenüber Spiegelungen an dessen sechs Symmetrieebenen invariant ist. Ein prominentes Beispiel ist die Barth'sche Sextik (Bild rechts oben). Dazu genügt es, wenn sie nur von den zwei Polynomen $P_6=(\tau^2x^2-y^2)(\tau^2y^2-z^2)(\tau^2z^2-x^2)$ und $K=x^2+y^2+z^2-1$ abhängig ist ($\tau=(\sqrt{5}+1)/2$ ist das Verhältnis des



goldenen Schnitts). Denn die vollkommene Symmetrie der Kugel K stört keine andere Symmetrie. Dagegen macht jeder andere nichtkonstante Term die Fläche unsymmetrisch – was künstlerisch ganz reizvoll sein kann.

Viele weitere Anregungen sind dem bereits abgeschlossenen Wettbewerb der »Zeit« (www.zeit.de/matheskulptur) zu entnehmen.

Einsendeschluss ist Dienstag, der 27. Mai. Eine Jury aus

▶ Andreas Daniel Matt, Kurator der Ausstellung »Imaginary«

▶ Daniel Lordick, Vorstandsmitglied der Deutschen Gesellschaft für Geometrie und Grafik (DGfGG)

▶ Christoph Pöppe, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft

bestimmt unter den eingesandten Arbeiten die drei Gewinner.

1. Preis: ein Jahresabonnement Spektrum der Wissenschaft

2. Preis: eine Mathematik-Armbanduhr (www.science-shop.de/artikel/760507)

3. Preis: ein Magnet-Schwebeglobus (www.science-shop.de/artikel/713547)

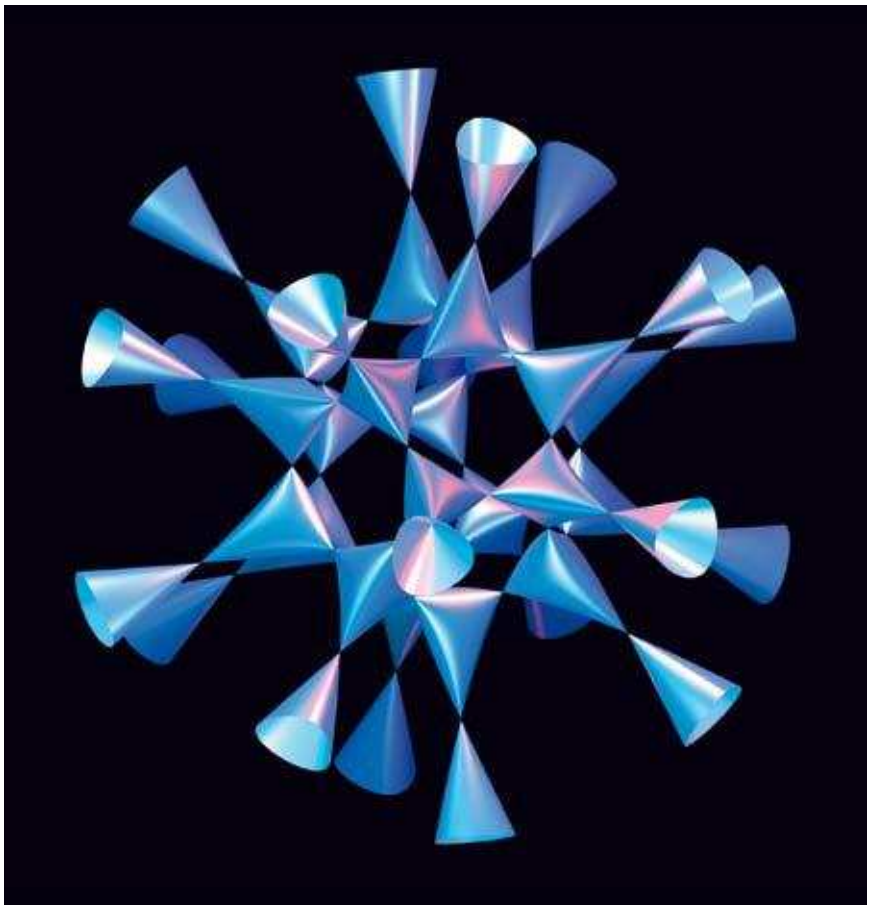
Auf der Webseite www.spektrum.de/mathekunst finden Sie

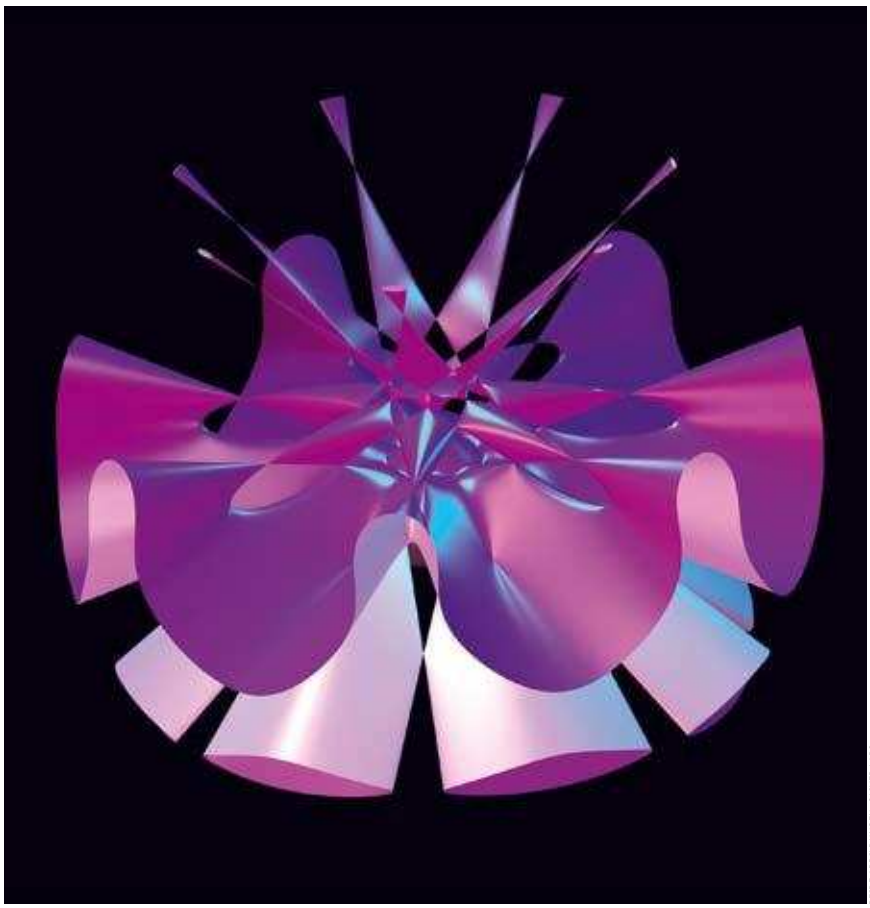
▶ das Programm »Surfer« zum Download für Windows- und Linux-Rechner,

▶ ein Formular, mit dessen Hilfe Sie Ihr Bild oder Ihren Film samt Zusatzinformationen zur Online-Veröffentlichung und zum Wettbewerb einreichen können,

▶ ausführliche Zusatzinformationen zum Thema, verfasst von den Mathematikern Gert-Martin Greuel, Oliver Labs und Duco van Straten, im PDF-Format zum Download.

Die Barth'sche Sextik mit 65 Singularitäten (oben); die Septik von Oliver Labs mit 99 Singularitäten (unten)





BEIDE ABBILDUNGEN: OLIVER LABS

unbekannt. Für den Grad 7 hält gegenwärtig die von dem Saarbrücker Mathematiker Oliver Labs entdeckte Labs'sche Septik mit 99 Singularitäten den Rekord.

Was passiert, wenn man diesen oder jenen Koeffizienten ein bisschen verändert oder dort ein Vorzeichen umdreht? Die teilweise überraschenden Folgen solcher Aktionen bekommt man in der Ausstellung dank raffiniert geschriebener Software in wenigen Sekunden auf der Großleinwand zu sehen – oder auch auf dem heimischen Computer. Das Programm »Surfer«, das dahintersteckt, läuft nicht nur in der Ausstellung; man kann es aus dem Internet herunterladen.

Die Wochenzeitung »Die Zeit« hatte im Januar und Februar dieses Jahres jedermann eingeladen, dem Publikum und einer Jury die schönsten selbst gefundenen algebraischen Flächen zu präsentieren. Bis zum Einsendeschluss am 29. Februar haben begeisterte Hobby-Algebraiker dort eine bunte Vielfalt von knapp 600 Flächen zur Schau gestellt (www.zeit.de/matheskulptur).

Inzwischen hat die Gruppe von der Universität Kaiserslautern, die das Programm »Surfer« entwickelt hat, daran weitergearbeitet. Man kann jetzt mehrere algebraische Flächen in ein und dasselbe Bild setzen und elementares Kino betreiben: Auf einen Mausklick hin erzeugt das Programm eine Serie von Bildern, bei denen sich der Wert eines Parameters allmählich verändert oder die Figur gedreht wird.

Aus diesem Anlass legen wir einen neuen Wettbewerb auf (siehe die Ankündigung auf der linken Seite). Finden Sie die Formel für die schönste, wildeste oder überraschendste – möglicherweise bewegliche – Fläche und senden Sie uns Bild oder Filmsequenz ein. Ihr Werk wird auf der Stelle online veröffentlicht und kandidiert für einen der drei Preise. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOR

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/943427.

Kleine Wellen für Kunst und Kunststoff

Wavelets (»Wellchen«) sind ein flexibles Mittel zur Approximation von Funktionen mit sehr uneinheitlichem Verlauf. Sie eignen sich, um die Struktur eines Gemäldes zu erfassen und damit seine Echtheit zu bestimmen, ebenso wie dafür, einen Produktionsprozess unter Zeitdruck und dennoch präzise zu steuern.

Ehre, wem Ehre gebührt

Ob ein Gemälde tatsächlich aus Meisterhand stammt, ist unter Kennern häufig umstritten. Jetzt soll die Mathematik dabei helfen, Fälschungen zu entlarven.

Von Uta Deffke

Im Frühjahr 2005 ging Alex Matter mit einem erstaunlichen Fund an die Öffentlichkeit: In einem Lagerhaus seines Vaters Herbert Matter auf Long Island (New York) habe er vor drei Jahren 32 Bilder des 1956 verstorbenen Malers Jackson Pollock entdeckt, eingeschlagen in braunes Papier. Herbert Matter war mit dem berühmten Vertreter des abstrakten amerikanischen Expressionismus befreundet gewesen, dessen bekannteste Bilder durch so unkonventionelle Techniken wie klecksende Farbkannen entstanden. Alex Matter war von der Echtheit der Gemälde überzeugt; zwei eigens angeheuerte Pollock-Experten kamen zum selben Ergebnis.

Anfang 2006 allerdings meldete sich die Pollock-Krasner Foundation zu Wort, die den Nachlass des Künstlers verwaltet. Sie hegt erhebliche Zweifel an der Echtheit der Bilder. Dabei stützt sie sich nicht nur auf die Aussage des hauseigenen Kunsthistorikers Francis O'Connor, sondern auch auf die Berechnungen eines Physikers.

Richard Taylor von der University of Oregon in Eugene, selbst ausgebildeter Künstler, ist seit Jahren fasziniert von dem Schaffen des amerikanischen Expressionisten. Die abstrakten Gemälde animierten ihn zu mathematischen Analysen, deren Ergebnisse er in der Fachzeitschrift »Nature« veröffentlichte. Taylor entdeckte in den Werken Pollocks charakteristische, auf verschiedenen typischen Größenskalen wiederkehrende Muster – so genannte Fraktale. Solche Strukturen kommen häufig in der Natur vor, bei Schneeflocken etwa, bei Blumenkohl oder bei Küstenlinien, die stets gleichartige Formen zeigen, einerlei ob man sie aus der Ferne, aus der Nähe oder gar mit der Lupe betrachtet.

Nicht nachzuweisen war diese Selbstähnlichkeit aber in den Werken, die Alex Matter gefunden hatte. »In den uns zur Verfügung stehenden sechs Bildern konnten wir diese typische Handschrift Pollocks nicht finden«, ließ Taylor verlauten. Für den Physiker ein schlagkräftiger Beweis, durch den sich auch der Kunsthistoriker O'Connor bestätigt sieht. Trotzdem ist die Pollock-Krasner Foundation noch nicht zu einem endgültigen Urteil gekommen. Denn es gibt auch Experten – sowohl aus der Kunstszene als auch aus den Naturwissenschaften –, die zweifeln, ob Taylors Verfahren wirklich geeignet ist, den Stil des Malers eindeutig zu charakterisieren.

Genau das wird im Millionengeschäft mit der Kunst aber immer wichtiger. Nicht nur Liebhaber und Spekulanten, die alljährlich bei Christie's und Sotheby's horrende Summen für Kunstwerke bieten, verlangen einen sicheren Nachweis über die Echtheit der Objekte. Auch Ausstellungsbesucher und Kuratoren wollen die Gewissheit haben, dass der Meister selbst

Das von den drei Universitäten, dem Konrad-Zuse-Zentrum und dem Weierstraß-Institut in Berlin getragene DFG-Forschungszentrum

MATHEON

hat im vergangenen Jahr einen Medienpreis für journalistische Arbeiten zum Thema »Mathematik in technologischen Anwendungen« ausgeschrieben. Wir drucken hier die Artikel ab, die den 2. und den 3. Preis gewonnen haben. Der Artikel »Das Orakel von London« des ersten Preisträgers Dirk Schneider ist in der Zeitschrift »Zeit Wissen«, April 2007, S. 64 – 68, erschienen.

Pinsel oder Farbkanne geschwungen hat und nicht ein namenloser Schüler oder ein geschickter Fälscher.

Wie Taylor ist auch Rick Johnson von der amerikanischen Cornell University Wandler und Mittler zwischen zwei Welten. Seine Liebe zur Kunst entdeckte der 57-jährige Elektroingenieur als Austauschstudent in Deutschland. Damals waren es seine Hannoveraner Gasteltern, die ihn bei einem Berlin-Besuch erstmals in ein Museum mitnahmen. »Seitdem hat mich die Kunst nicht mehr losgelassen«, erzählt der Mann, der einen Strohhut und einen weißen Vollbart trägt. Zurück in Amerika machte er zusätzlich seinen Abschluss in Kunstgeschichte. Nun endlich sei die Zeit reif für eine engere Kooperation zwischen den Disziplinen.

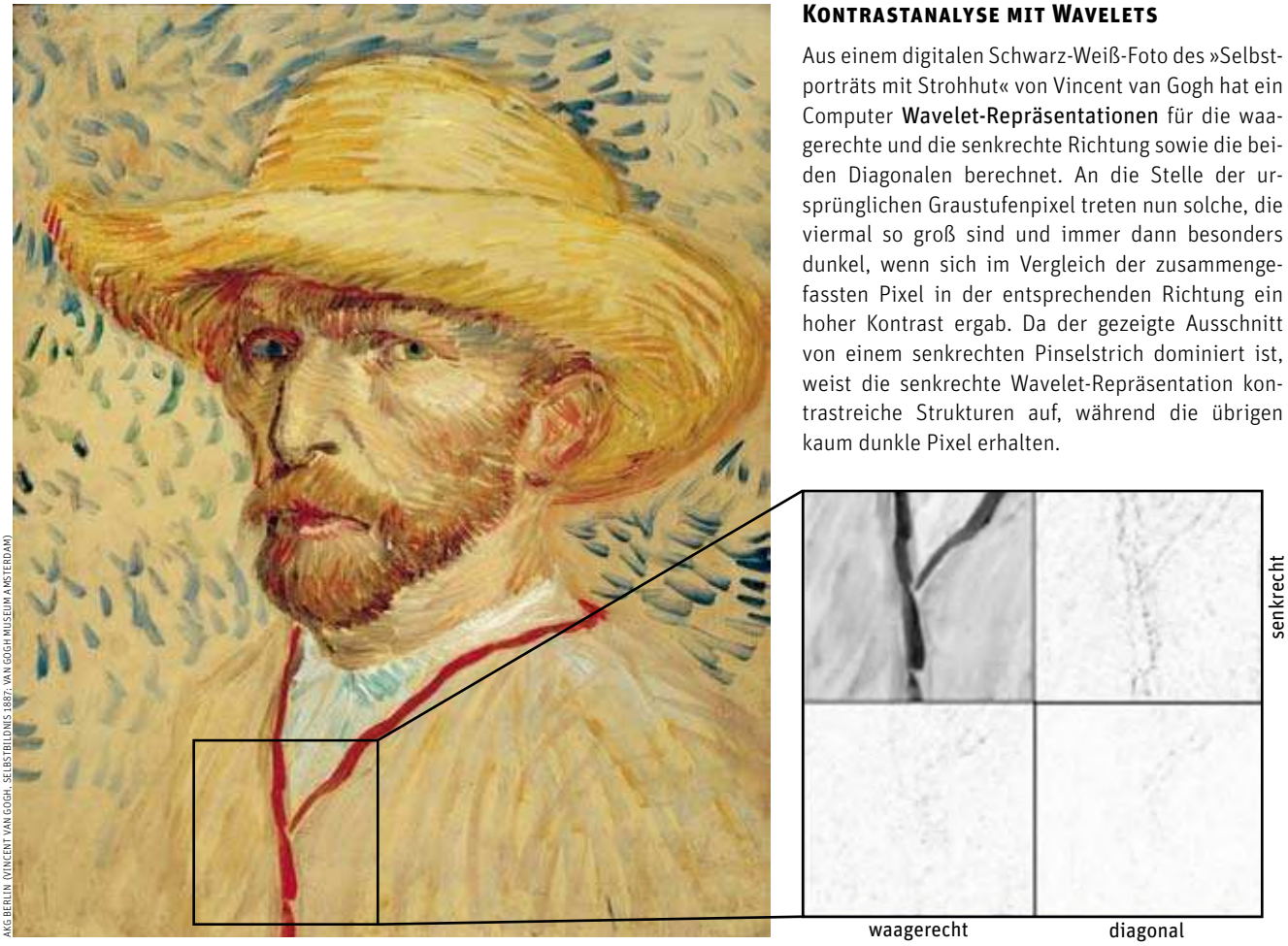
Zu diesem Zweck organisierte er im Mai 2007 einen Workshop im Amsterdamer Van Gogh Museum. Dort trafen erstmals Mathematiker und Informatiker auf Kunstexperten aller Couleur, um sich über ihre Methoden und gegenseitigen Erwartungen auszutauschen.

Dass sich immer mehr Vertreter dieser Wissenschaft mittlerweile auf künstlerisches Terrain wagen, liegt an den jüngsten rasanten Fortschritten in der digitalen Bildverarbeitung. Mittlerweile können typische Merkmale eines Malers aus seinen Bildern regelrecht herausgerechnet werden. Damit sind sie in Zahlen fassbar und lassen sich leichter mit den Merkmalen weiterer Bilder vergleichen.

Analyse des Pinselstrichs

Ihren Ursprung hat die mathematisch basierte Stilkunde in der Literaturwissenschaft. Schon Ende des 19. Jahrhunderts schlug der polnische Historiker Wincenty Lutoslawski vor, statistische Methoden zur Identifizierung eines Autors und zur Analyse stilistischer Entwicklungen einzusetzen. So lassen sich tatsächlich aus der Häufigkeit bestimmter Wörter in einem Text eindeutige Rückschlüsse auf den Urheber ziehen.

»Bei Malern finden wir in Pinselstrich und Textur eines Bilds eine Art grafisches Vokabular, das sehr charakteristisch ist«, sagt Ella Hendriks, Chefrestauratorin des Amsterdamer Van Gogh Museums. Auf ihrem Labortisch landen regelmäßig Gemälde zweifelhaften Ursprungs: Funde von verstaubten Dachböden,



AKG BERLIN (VINCENT VAN GOGH: SELBSTBILDNIS 1887; VAN GOGH MUSEUM AMSTERDAM)

Kontrastanalyse mit Wavelets

Aus einem digitalen Schwarz-Weiß-Foto des »Selbstporträts mit Strohhut« von Vincent van Gogh hat ein Computer **Wavelet-Repräsentationen** für die waagerechte und die senkrechte Richtung sowie die beiden Diagonalen berechnet. An die Stelle der ursprünglichen Graustufenpixel treten nun solche, die viermal so groß sind und immer dann besonders dunkel, wenn sich im Vergleich der zusammengefassten Pixel in der entsprechenden Richtung ein hoher Kontrast ergab. Da der gezeigte Ausschnitt von einem senkrechten Pinselstrich dominiert ist, weist die senkrechte Wavelet-Repräsentation kontrastreiche Strukturen auf, während die übrigen kaum dunkle Pixel erhalten.

private Erbstücke oder auch Werke, über die sich Experten schon seit Jahren streiten.

Wenn sie sich auf die Suche nach Indizien für den berühmten Maler Vincent van Gogh (1853–1890) begibt, verlässt sie sich zuerst auf ihren Blick. Der ist geschult an hunderten Bildern des Malers und bezieht ihr Wissen über dessen Wahl von Motiven, Leinwand, Farben, Pinseln und Techniken in die Bewertung ein. Dazu kommen reichhaltige Kenntnisse über die Biografie des Künstlers, seine Lebensumstände und seine schöpferischen Phasen. Dokumente wie Briefe, Tagebücher oder Fotos können ebenfalls nützlich sein.

Ohne technische Hilfsmittel kommen Kunsthistoriker aber heute nicht mehr aus. Ella Hendriks' Arbeitsplatz erinnert an ein Labor der Gerichtsmedizin: Über einen großen, blanken Tisch ist ein Mikroskop schwenkbar, an der Wand hängt ein Schaukasten für Röntgenbilder, in einer Ecke stehen Reagenzgläser und Chemikalien. Chemische Analysen helfen, Farben einer bestimmten Zeit, einem Hersteller oder gar einem Künstler zuzuordnen. Spektralanalysen ermöglichen den Blick auf verborgene Farbschichten. Röntgenstrahlen machen typische Leinwandstrukturen und Kohleskizzen unter der Farbe sichtbar.

Dennoch gelingt es selbst ausgewiesenen Kennern mit all diesen Methoden nicht immer, ein Bild zweifelsfrei zuzuordnen. Hier könnten statistische Methoden helfen. »Bei van Gogh beobachten wir bei bestimmten Figuren einen nahezu rhythmischen Farbauftrag«, sagt Ella Hendriks. Doch Derartiges systematisch zu charakterisieren hat noch niemand unternommen. Länge und Breite eines Pinselstrichs lassen sich noch einigermaßen per Hand ausmessen. Dagegen ist es sehr schwierig, ohne Computerhilfe Feinstrukturen, Kurvenformen oder Zusammenhänge von Breite und Länge zu beschreiben, die einen Rückschluss auf das Malgerät und die Pinselführung des Künstlers zulassen würden.

Welche Hilfestellung die Mathematik dabei schon geben kann, zeigte der Amsterdamer Workshop. Die teilnehmenden Teams hatten bereits im Vorfeld 101 Gemälde untersucht, die größtenteils von van Gogh stammen; 20 können ihm nicht oder nicht eindeutig zugeordnet werden. Da die Bilder dieses Meisters sehr gut dokumentiert und im Wesentlichen auf wenige Museen konzentriert sind, war es relativ einfach, den Wissenschaftlern reichlich schwarz-weiße Digitalfotos der Gemälde als aussagekräftige Arbeitsgrundlage zur Verfügung zu stellen.

Damit liegen sie schon als Zahlenwerk vor; denn jedem der Millionen Pixel des Fotos ist eine Graustufe und damit ein Zahlenwert zugeordnet. Pixel für Pixel können sich dann Computerprogramme auf die Suche nach der Handschrift des Künstlers begeben.

Ingrid Daubechies, Mathematikerin von der Princeton University, setzt für die Analyse, wie die meisten der übrigen Teilnehmer, so genannte Wavelets ein. Diese Methode hat sie selbst in den 1980er Jahren entscheidend mitentwickelt und zu zahlreichen Anwendungen getrieben, zum Beispiel zur Komprimierung von Bilddaten, zur Analyse medizinischer Bilder oder auch zur Verarbeitung von Musikdaten.

Um aus den Wavelet-Daten charakteristische Merkmale für van Gogh herauszufinden, ließen die Wissenschaftler die Computerprogramme zunächst an den Daten der Originale lernen und prüften dann, ob sich die Imitate tatsächlich in diesen Punkten unterscheiden.

Selbst mit chemischen Analysen, Spektralanalysen und Röntgenaufnahmen gelingt es auch ausgewiesenen Kennern nicht immer, ein Gemälde einem Künstler zweifelsfrei zuzuordnen

Die zittrige Feinstruktur verrät den Fälscher

Ingrid Daubechies entdeckte, dass es bei van Gogh einen eigentümlichen Zusammenhang zwischen Strukturen auf verschiedenen Größenskalen gibt – ein ganz ähnliches Phänomen, wie es Richard Taylor mit den Fraktalen bei Pollock beobachtete. Nur wiederholen sich die Muster hier nicht in den unterschiedlichen Dimensionen. Stattdessen haben zum Beispiel Pinselstriche bestimmter Ausmaße und Richtung stets ein gleichartig strukturiertes Innenleben.

Da einem Fälscher die sichere Hand des Meisters fehlt, kann er zwar die äußere Form eines Farbflecks recht gut treffen, eine zittrige Feinstruktur aber nicht vermeiden. Dieser Zusammenhang kommt bei feinen und groben Pinselstrichen unterschiedlich zur Geltung und ist mit bloßem Auge nicht zu erkennen.

In ihren Daten haben die Forscher viele weitere Zusammenhänge gefunden, die für van Goghs Bilder charakteristisch sind, in den Werken anderer Künstler aber nicht auftauchen. Ob und wie man diese mathematischen Unterschiede mit bloßem Auge in den Bildern wiederfinden kann, ist bislang nicht klar; aber für eine Unterscheidung zwischen Original und Fälschung könne es gleichwohl hilfreich sein, meint Ella Hendriks.

»Unser Ziel ist es, den Kunsthistorikern eine Art drittes Auge zu verschaffen, mit dem sie einen neuartigen Blick auf die Gemälde bekommen«, sagt Daubechies. »Um unsere Methoden gezielt einsetzen und entwickeln zu können, müssen wir aber noch viel mehr darüber wissen, wie die Experten Bilder betrachten.« Das sei vergleichbar mit der Bildverarbeitung in der Medizin, wo man auch viel von Ärzten habe lernen müssen.

Zu ähnlichen Ergebnissen wie Daubechies sind auch James Wang und Jia Li von der Pennsylvania State University gekommen. Sie konzentrierten sich auf die Analyse der Gemäldetextur, also der Oberflächenstruktur. Wieder fand das Programm nach Training an echten Bildern deutliche Unterschiede zwischen Originalen und Fälschungen. »Woran das genau liegt, müssen wir noch herausfinden«, sagt James Wang.

Für eine genaue Analyse müssten vor allem noch die Methoden zur Untersuchung der Pinselstriche verbessert werden. Noch können die Wavelet-Filter die Kante eines Farbkleckses nicht von einem Riss in der Farbe oder der durchscheinenden Leinwand unterscheiden.

Bislang liefert auch keine der neuen Methoden Resultate, auf die sich ein Kunsthistoriker in seinem Urteil verlassen würde. Das haben die Experten aber auch nicht erwartet. »Wir stehen schließlich noch ganz am Anfang unserer Arbeit und wollen erstmal voneinander lernen«, sagt Rick Johnson. In Zukunft erwartet er eine wahre Explosion auf dem Gebiet der digitalen Kunstanalyse. Denn Museen gehen vermehrt dazu über, ihre Kunstschätze auch digital zu archivieren. Dieser Datenschatz müsse nur noch von Mathematikern entdeckt werden.

»Ob sich hier tatsächlich ein neues praktisches Werkzeug für uns entwickeln wird, werden wir sehen«, sagt Louis van Tilborgh, Kurator des Van Gogh Museums. »Grundsätzlich sind wir aber auch für diese Art von Hilfsmittel offen.« Denn die Kunsthistoriker haben trotz ihrer Kennerschaft und abseits der bloßen Identifizierung noch viele offene Fragen an den Stil eines Künstlers, die sie hoffen, vielleicht eines Tages auch mit Computerhilfe beantworten zu können. ◁

Uta Deffke ist promovierte Physikerin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin im Journalistenbüro Schnittstelle in Berlin. Sie schreibt vorwiegend über Technik, Physik, Mathematik, Werkstoffe und Energie.

Fractal analysis of Pollock's drip paintings. Von Richard P. Taylor, Adam P. Micolich und David Jonas in: Nature, Bd. 399, S. 422, 1999

Möglichst optimal, aber vor allem rechtzeitig

Echtzeitoptimierung ist Rechnen bei laufender Produktion – mit dem Zeitdruck im Nacken.

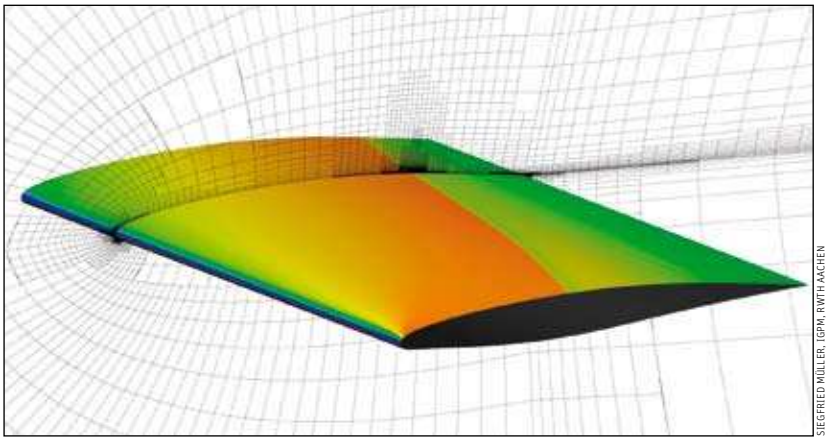
Von Claas Michalik und Arndt Hartwich

Optimierung betreibt jeder im täglichen Leben. Was tun Sie, wenn Ihnen der Kaffee zu stark ist? Sie nehmen am nächsten Morgen etwas weniger Kaffeepulver und am darauffolgenden vielleicht noch weniger, bis der Kaffee genau so ist, wie Sie ihn gerne trinken. Wenn Sie sehr anspruchsvoll sind, werden Sie nach einiger Zeit die Kaffeemenge wieder anpassen müssen, da das Kaffeepulver durch die Lagerung seine Eigenschaften verändert. Das Leitungswasser unterliegt Qualitätsschwankungen und wird beispielsweise im Sommer stärker mit Chlor versetzt. Vielleicht setzt sich auch die Kaffeemaschine auf die Dauer mit Kalk zu.

Wer stets den perfekten Kaffee will, muss alle diese Einflussfaktoren ständig überprüfen und, was noch schwieriger ist, die Menge des Kaffeepulvers und andere Größen immer auf die aktuellen Bedingungen einstellen. Im Extremfall müssten Sie vor der perfekten Tasse Kaffee jeden Morgen drei bis vier Probetassen aufsetzen – und wegschütten.

Stellen Sie sich nun statt der biederen Kaffeemaschine eine großtechnische Anlage zur Herstellung eines Medikamentes vor, das strenge Anforderungen erfüllen muss, damit es gefahrlos verwendet werden kann. Hier gibt es eine Vielzahl von Einflussparametern, wie die schwankende Qualität der Ausgangsstoffe, und Stellgrößen, wie deren Menge; und wenn die Maschine nicht einen Großteil der Zeit ein unverkäufliches Produkt herstellen soll, muss man das schlichte Probieren durch ein strukturiertes Vorgehen ersetzen.

Das wichtigste Prinzip lautet: Man soll die Qualität des Kaffeepulvers nicht erst am fertigen Kaffee bestimmen, sondern an den ersten



SIEGFRIED MÜLLER, IGPM, RWTH AACHEN

Das (zweidimensionale) Netz der Diskretisierung zur Berechnung der Strömung um einen Tragflügel. Wo Luftdichte und -geschwindigkeit stark variieren, wie an der Flügelvorderkante, wird eine hohe Auflösung benötigt. Diese auf das gesamte Rechengebiet anzuwenden würde nur den Aufwand drastisch erhöhen, ohne nennenswert Genauigkeit einzubringen.

Tropfen, die aus der Maschine kommen, um im Bedarfsfall das Produkt, zum Beispiel durch Änderung der Dosierung, noch zu retten. Man muss also den gegenwärtigen Zustand messen, errechnen, was zu tun ist, und das in die Tat umsetzen, und das alles innerhalb der Zeitspanne, die der physikalische Prozess vorgibt.

Das ist das Problem der Echtzeitoptimierung. Mathematiker und Verfahrenstechniker der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen haben sich in einem gemeinsamen Schwerpunktprojekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft konzeptionell mit dieser Problematik befasst.

Der Dreischritt der Simulation

Die wesentlichen Schritte auf dem Weg zu einem perfekten Kaffee oder zum optimalen technischen Prozess sind:

- das Modell: eine ausreichend genaue, mathematisch formulierte Antwort auf die Frage »Was passiert in der Kaffeemaschine?«;
- die Berechnung: eine numerische Methode zur Auswertung dieses Modells;
- die Optimierung: eine effektive Strategie, die uns genau sagt, wie wir an welcher Stellgröße drehen müssen, um so schnell wie möglich zu einer perfekten Tasse Kaffee zu kommen.

Im ersten Schritt müssen wir Methoden zur Vorhersage des Systemverhaltens entwickeln. Reicht die Kühlleistung des Flusswassers auch im Hochsommer aus, um den Kernreaktor zu temperieren? Schafft es der A380, von der Startbahn abzuheben? Bleibt der Autofahrer bei einem Frontalzusammenstoß mit 50 Stundenkilometern unverletzt? Der experimentelle Zugang wie beim Kaffeekochen verbietet sich hier. Die Frage lässt sich schließlich so beantworten, wie es uns gelingt, das Wetter vorherzusagen. Sowohl das globale Luftdrucksystem als auch die Chemieanlage werden im Computer virtuell nachgebildet, und zwar durch ein System von Gleichungen, das die physikalischen Gesetze wiedergibt. Dieses mathematische Modell der Realität erlaubt es uns dann, durch Lösen der Gleichungen den zukünftigen Zustand des Systems zu bestimmen. Bei der Chemieanlage gelingt uns darüber hinaus, was beim Wetter wohl ewig ein Traum bleiben wird: durch gezieltes Einwirken auf sein Verhalten einen erwünschten Zustand herbeizuführen.

Der zweite Schritt besteht im Lösen dieser Gleichungen, und zwar in Echtzeit. Wegen der Zeitbeschränkung kommt es erstens – auch im Zeitalter des Supercomputers – darauf an, bereits das abstrakte Lösungsverfahren so geschickt zu wählen, dass der Rechenaufwand erträglich bleibt. Zweitens sollte man die Arbeit in Teilaufgaben zerlegen, welche die Teilrechner (Prozessoren) eines Parallelrechners weit gehend unabhängig voneinander erledigen können. Drittens und vor allem aber muss man ein Sortiment von Lösungsmethoden mit unterschiedlicher Präzision und unterschiedlichem Zeitaufwand bereitstellen, sozusagen einen Turm von Verfahren: Der Computer berechnet zunächst mit dem untersten Verfahren des Turms eine schnelle, ungenaue Lösung. Wenn noch Zeit bleibt, wendet er das nächsthöhere Verfahren an, wobei er auf der bereits gefundenen Lösung aufbaut, dann das dritte Verfahren des Sortiments und so weiter, bis die verfügbare Zeit abgelaufen ist. So hat er, wenn die Zeit knapp wird, immerhin eine akzeptable Lösung anzubieten.

Eine effiziente Lösung des Simulationsproblems ist die Grundvoraussetzung für den letzten Schritt, die numerische Optimierung selbst. Man will Einflussgrößen so festlegen können, dass ein definiertes Gütekriterium optimiert wird. Zum Beispiel soll der Gewinn maximiert, die Produktionsdauer minimiert oder das Aroma des Kaffees optimiert werden.

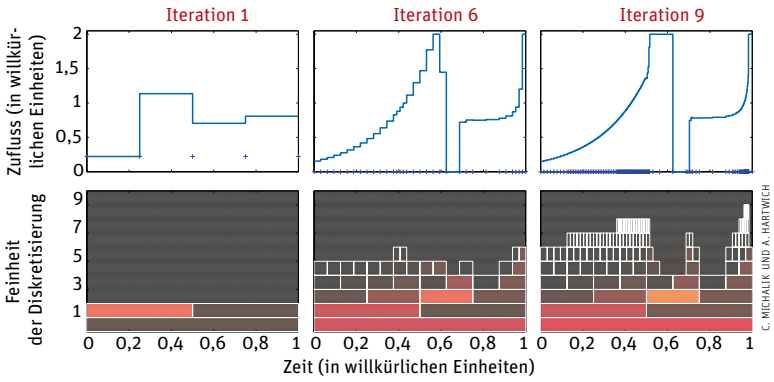
Besonders aufwändig ist dabei die Optimierung eines dynamischen Prozesses, da hier

Adaptive Diskretisierung

Einre Bakterienkultur in einem Bioreaktor produziert ein spezielles Protein und benötigt dafür Glukose. Um eine optimale Ausbeute an Protein zu erzielen, muss die Glukose in zeitlich stark schwankenden Mengen zugeführt werden. Die oberen Diagramme zeigen den Zufluss an Glukose pro Zeiteinheit, der durch die Optimierung bestimmt werden soll.

Die Funktion wird approximiert durch eine Linearkombination von Wavelets. Für jeden Verbesserungsversuch (jede »Iteration«) werden gewisse feinere Wavelets mit zu den Basisfunktionen hinzugenommen (untere Diagramme). Das Programm findet selbsttätig heraus, in welchen Teilintervallen die Lösung noch schlecht ist (angegeben durch die Farbe der Kästchen), und erhöht dort die Genauigkeit.

Der mit dem optimierten Verfahren (9. Iteration, rechts) gesteuerte Prozess liefert eine deutlich höhere Ausbeute als ein grob gesteuerter. Es stellt sich heraus, dass den größten Teil der Zeit nur mäßige Genauigkeit erforderlich ist. Der steile Anstieg der Zufuhr bei 0,5 und zum Schluss sowie das Ende der »Hungerzeit« bei 0,7 müssen allerdings sehr präzise getroffen werden.



die festzulegende Einflussgröße nicht einfach eine Zahl ist, sondern eine Funktion der Zeit. So sind während der Polymerisationsreaktion zur Herstellung eines Kunststoffes, die ungefähr eine Stunde dauert, die Temperatur und der Druck zu variieren. Das Problem hat also nicht nur eine Unbekannte, sondern im Prinzip unendlich viele: Temperatur und Druck zu jedem Zeitpunkt.

Da man mit unendlich vielen Unbekannten ohnehin nicht rechnen kann, muss man das Problem durch ein endliches ersetzen, dessen Lösung der eigentlich gesuchten Lösung möglichst nahekommt. Ähnliche Fragestellungen beschäftigen auch Hersteller von Geräten wie Druckern, Monitoren oder Fernsehern. Ein Beispiel: Ein Kreis besteht aus unendlich vielen, unendlich kleinen Punkten, die ein Drucker unmöglich alle aufs Papier bringen kann. Um darstellbar zu sein, wird der perfekte Kreis – und jede andere Form – diskretisiert, das heißt aus kleinen Punkten *(dots)* aufgebaut. Wer aus der Nähe hinschaut, sieht beim Fernseher diese Bildpunkte in den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau.

Verschiedene Feinheitsgrade

So wie der Kreis beim Drucker wird die optimale Temperaturfunktion im Reaktor durch aneinandergereihte, kurze, konstante Stücke diskretisiert. Wie fein soll die Diskretisierung sein, das heißt, wie viele dieser Stücke soll man nehmen? Beliebig viele können es nicht sein. Zu große Ansprüche scheitern beim Fernseher an den Kosten, bei der Optimierung am Rechenaufwand. Für den Käufer eines Fernsehers stellt sich die Frage: Brauche ich einen High-Definition-Fernseher, oder reicht mir auch ein normales Gerät? Der Optimierer muss entsprechend entscheiden, wie fein die Diskretisierung sein darf.

In manchen Fällen, etwa bei der Optimierung der Tragflächen des A380, ist die Rechenzeit nicht grundsätzlich entscheidend, in anderen Fällen dagegen sehr, weil sie durch den Prozess selbst beschränkt ist. Wenn kein Kaffee weggeschüttet werden soll, muss das Optimierungsverfahren möglichst noch während des ersten Brühvorgangs ein Ergebnis liefern. Bei der Herstellung eines Medikaments mit schwankender Rohstoffqualität stehen vielleicht nur einige Minuten zur Verfügung und bei anderen Anwendungen nur Bruchteile von Sekunden.

Die in unseren Arbeitsgruppen entwickelten Methoden machen sich zu Nutze, dass man verschiedene Feinheiten der Diskretisierung wählen kann. Man rechnet gewissermaßen auf verschiedenen Größenskalen, daher der Name »Multiskalenmethoden«. Die Verfahren unseres Turms sind »unten« schnell und ungenau mit grober Diskretisierung, »oben« dagegen zeitaufwändig und präzise mit feiner Diskretisierung. Der Übergang von einem Verfahren zum nächsthöheren besteht in einer Verfeinerung der Diskretisierung. Dabei können die vorher berechneten groben Lösungen als Startwerte für das höhere Verfahren verwendet werden.

Zudem werden die Verfeinerungen nicht global durchgeführt, sondern adaptiv. Wir ersetzen also die kurzen Stücke, durch die wir unsere Funktion approximieren, nicht überall durch noch kürzere, sondern nur dort, wo die Funktion am heftigsten variiert. So können wir mit einer relativ geringen Zahl an zusätzlichen Unbekannten einen großen Zuwachs an Lösungsqualität erzielen (Kasten links).

Um genau zu sein: Wir approximieren unsere Funktionen nicht durch kurze, konstante Stücke, sondern durch Summen von gewissen Basisfunktionen, wobei jede Basisfunktion noch mit einem Faktor multipliziert wird. Die Unbekannten unseres Gleichungssystems sind jetzt nur noch diese Faktoren. Die Basisfunktionen wählen wir möglichst passend zu dem erwarteten Funktionsverlauf. In unserem Fall sind es so genannte Wavelets, wie sie beispielsweise auch im Verfahren JPEG 2000 zur Bildkomprimierung verwendet werden (Spektrum der Wissenschaft 7/2001, S. 84). Es gibt langsam variierende Wavelets mit großer Reichweite und schnell variierende, die sich nur in einem kurzen Zeitintervall bemerkbar machen. Anstelle einer feineren Diskretisierung nehmen wir entsprechend schmale, an dieser Stelle lokalisierte Wavelets zu unseren Basisfunktionen hinzu.

Auf der Basis dieses Lösungsansatzes entwickeln wir das Softwareprodukt DyOS. Es wird zur Lösung großer Fallstudien aus der industriellen Praxis genutzt, bei denen bis zu vier Millionen Gleichungen zu lösen sind.

Adaptive Verfeinerungstaktiken kommen auch in anderen Bereichen zum Einsatz. Bei der Berechnung der Strömung um einen Tragflügel (Bild S. 75) wird durch die adaptive Diskretisierung das Problem signifikant verkleinert und benötigt deutlich geringere Rechenzeiten bei gleichzeitig hoher Genauigkeit.

Die Entweder-Oder-Entscheidung beim Fernseherkauf können wir also im Bereich der Prozessoptimierung durch eine Und-Lösung ersetzen. Wir haben den normalen und den High-Definition-Fernseher gleichzeitig, oder genauer: zu jedem Zeitpunkt genau das, was wir gerade brauchen. Was man sich beim Heimkino wünschen würde, bekommt bei großen technischen Anlagen weitaus größere Bedeutung. ◁

EIN INSTITUT FÜR SIMULATION

Das neu gegründete Center for Computational Engineering Science (CCES) an der RWTH Aachen vereint die drei Teildisziplinen der Simulation – Modellierung, Ingenieurwissenschaft und Methodenentwicklung – unter einem Dach. Ein Studiengang für Computational Engineering Sience wurde bereits eingeführt; die Graduiertenschule AICES, die im Rahmen der Exzellenzinitiative eingeworben werden konnte, soll die zukünftige Generation von Simulationsexperten hervorbringen.

PETER WINANDY

Claas Michalik (rechts) und **Arndt Hartwich** haben an der RWTH Aachen Verfahrenstechnik studiert (Michalik auch an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh) und arbeiten zurzeit am Aachener Lehrstuhl für Prozesstechnik an der modellgestützten experimentellen Analyse mehrphasiger Reaktionssysteme (Michalik) und der dynamischen Optimierung (Hartwich).

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Wo bleibt die nächste *Pandemie?*

Reales und gefühltes Risiko korrespondieren nicht miteinander: Während es heute vergleichsweise ruhig um das Thema Vogelgrippe ist, hat sich die tatsächliche Bedrohung seit 2005 kaum verändert.

Von Barbara Müller
und Hans-Georg Kräusslich

Im Winter des Jahres 2005 wurde die Frage, wann wir mit der nächsten verheerenden Influenza-Pandemie – also einer Epidemie globalen Ausmaßes – rechnen müssen, in den deutschen Medien fast täglich gestellt. Weltweite Beunruhigung, ausgelöst durch die zunehmende Verbreitung des Influenza-Virus H5N1 (siehe Randspalte gegenüber) unter Wild- und Hausgeflügel sowie vereinzelte Übertragungen dieses aggressiven Tierseuchenerregers auf den Menschen, spiegelte sich in unzähligen Meldungen, in denen alle nur denkbaren Aspekte des Themas diskutiert wurden.

Die Berichte stießen in der Öffentlichkeit auf großes Interesse und verbreiteten ein Gefühl der akuten Bedrohung: ob nun über aktuelle Fallzahlen bei Tieren und Menschen, über Pläne zur Pandemiebekämpfung, Impfungen, Medikamente, Verhaltensmaßregeln für Reisende, Hundehalter, Jogger oder Zoobesucher bis hin zur möglicherweise lebensrettenden Wirkung von Meerrettich, Knoblauch oder Sonnenhutextrakt. Selbst bizarre Meldungen wurden von seriösen Medien aufgegriffen – wie etwa eine spezielle Quarantäne für die Raben des Londoner Towers. Selbstverständlich ließ sich die extreme Fokussierung auf ein Thema nicht dauerhaft aufrechterhalten und bewirkte letztlich leider das Gegenteil von echter Aufklärung und Aufmerksamkeit.

So ist inzwischen die vorhersehbare Gegenreaktion eingetreten: eine zum Teil überzogene »Pandemie der Panik« ist in Überdruss und Desinteresse umgeschlagen. Anfang 2008 lieferte Google News zum Stichwort Vogelgrippe nicht mehr 70 000, sondern nur noch knapp 500 Einträge. Nicht einmal die Keulung von rund 200 000 Enten in Bayern im vergangenen Herbst wegen eines Vogelgrippe-Ausbruchs – immerhin die bislang größte Geflügel-Massentötung in Deutschland – wurde in der Öffentlichkeit nennenswert diskutiert. Atemschutzmasken, so genannte Vogelgrippe-Schutz-Sets oder selbst antivirale Medikamente, vor zwei Jahren auf Grund von Hamsterkäufen Mangelware, blieben nun in den Regalen liegen. Das Influenza-Medikament Tamiflu, damals vom Ladenhüter zum Blockbuster aufgestiegen, wirkte sich im vergangenen Jahr auf die Bilanzen der Herstellerfirma eher negativ aus.

Eine zum Teil überzogene »Pandemie der Panik« ist in Überdruss und Desinteresse umgeschlagen

Dann war alles ja wohl nicht so schlimm? Diese Schlussfolgerung wäre jedoch genauso falsch – und genauso wenig hilfreich – wie überzogene Panik. Die Fachleute wissen: Das Thema Grippe-Pandemie ist heute so aktuell wie zuvor, denn an der Situation um den Erreger H5N1 hat sich in den vergangenen Jahren wenig geändert. Auch wenn sich derzeit keine konkrete Gefahr abzeichnet, geben die stetig zunehmende Ausbreitung des Erregers bei Geflügel und einige vermutete – allerdings nicht bewiesene – Fälle einer Übertragung von Mensch zu Mensch keinen Anlass zur Entwarnung. Wie also lässt sich die aktuelle Gefährdung objektiver einschätzen und wie kann man ihr sinnvoll begegnen? Diese Fragen beschäftigen Wissenschaftler und Politiker auf der ganzen Welt. Weit gehende Einigkeit be-

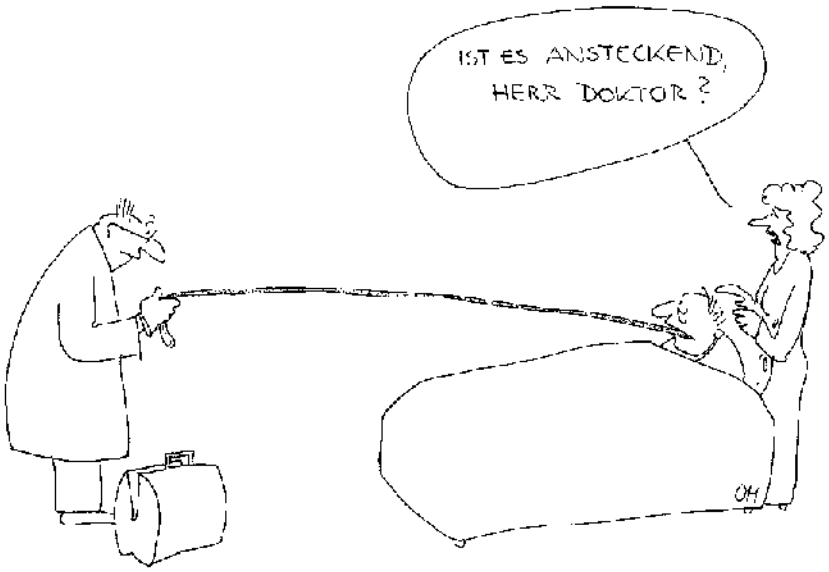
steht darüber, dass es irgendwann wieder eine Grippe-Pandemie geben wird. Darüber hinaus gibt es jedoch unterschiedliche Meinungen und vor allem viele offene Fragen.

Seit der ersten klar beschriebenen Influenza-Pandemie im Jahr 1580 gibt es Berichte von etwa 30 weltweiten Ausbrüchen dieser Erkrankung, die sich in Abständen von 10 bis 40 Jahren ereigneten. So hat das Virus die Geschichte der Menschheit vielfach beeinflusst, am dramatischsten wohl mit der Spanischen Grippe am Ende des Ersten Weltkriegs mit 20 bis 50 Millionen Opfern. Seit der Hongkong-Grippe von 1968/69 sind nun fast vier Jahrzehnte vergangen, die nächste Pandemie ist damit sozusagen überfällig. Entsprechend steigerte sich die Erwartung einer neuen Pandemie mit zunehmendem Abstand und mit ihr das prognostizierte potenzielle Risiko.

Dabei ist zu bedenken, dass sich aus den Pandemien der vergangenen vier Jahrhunderte nur eine statistische Wahrscheinlichkeit abschätzen lässt. Eine Vorhersage darüber, wann die nächste Pandemie auftritt, erlaubt diese nicht. Beim Roulette erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für Rot im nächsten Spiel ja auch nicht dadurch, dass zuvor zehnmal hintereinander Schwarz gefallen ist. Genauso kann sich die nächste Grippe-Pandemie, rein statistisch betrachtet, nächstes Jahr ereignen – oder noch lange auf sich warten lassen. Mit dem Vogelgrippe-Virus H5N1 ist allerdings in den 1990er Jahren ein Erreger aufgetreten, der als möglicher Vorbote einer neuen Pandemie gedeutet wurde.

Gemischtes Kartenspiel

Das hochpathogene Virus hat sich in den vergangenen zehn Jahren bei Geflügel dramatisch verbreitet und kann auf Menschen übertragen werden, wo es ebenfalls schwere Infektionen mit häufig tödlichem Verlauf auslöst. Andererseits zeigt die vergleichsweise geringe Anzahl von bisher rund 350 bestätigten H5N1-Infektionen bei Menschen, dass die Übertragung zwischen den Arten zumindest derzeit sehr ineffizient ist. Obwohl auch der Virustyp H5N1 im vergangenen Jahrzehnt eine Vielzahl genetischer Veränderungen durchlaufen hat, ist es ihm in diesem Zeitraum nicht gelungen, die entscheidende Eigenschaft eines Pandemie-Erregers zu erwerben: die leichte Übertragbarkeit von Mensch zu Mensch. Kann man daraus schließen, dass die Schwelle für die Mutation zum Pandemie-Auslöser für dieses Virus zu hoch liegt und es damit eine geringere Gefahr darstellt als angenommen?



Dafür muss man zunächst fragen, was ein erfolgreiches Pandemie-Virus ausmacht. Das kann beispielsweise entstehen, wenn sich ein Vogelgrippe-Erreger an den Menschen anpasst. Influenza-A-Viren – und zu denen zählt auch H5N1 – zeichnen sich durch eine außerordentliche Fähigkeit zur genetischen Verwandlung aus. Einmal können sie aufeinander folgende zufällige Mutationen ansammeln, durch die sich Proteine des Virus allmählich in ihrer Struktur und ihren Eigenschaften verändern (die so genannte Antigen-Drift). Zum andern können Influenza-Viren durch Austausch von Genomsegmenten zwischen verschiedenen Virusvarianten ihre Eigenschaften auch in einem einzigen Schritt drastisch verändern (so genannte Antigen-Shift).

Tauscht man zwischen Skat und Tarot einige Karten aus, dann entsteht ein gemischtes Kartenspiel, mit dem weder ein Skatspieler noch ein Wahrsager etwas anfangen könnte. Ähnlich beim Virus: Durch Neukombination verschiedener Formen der Oberflächenproteine Hämagglutinin (von dem bisher 16 Subtypen identifiziert wurden) und Neuraminidase (von der neun Varianten bekannt sind) können Viren entstehen, deren Oberfläche dem menschlichen Immunsystem unbekannt ist. Gegen den Überraschungsangriff einer solchen Neukombination sind wir also nicht gewappnet: Der Erreger breitet sich rasch aus. Bis heute ist nicht genau bekannt, worin sich

INFLUENZA-VIREN

- Die **Influenza**, auch »echte Grippe« genannt, ist eine durch Viren aus den Gattungen Influenzavirus A oder B ausgelöste Infektionskrankheit bei Menschen, anderen Säugetieren sowie Vögeln.
- **Influenza-Viren** sind gekennzeichnet durch die Oberflächenproteine Hämagglutinin (»H«) und Neuraminidase (»N«).
- Bisher sind vom **H-Protein** des Influenza-A-Virus 16 Subtypen identifiziert worden, vom **N-Protein** sind neun Varianten bekannt.
- Das derzeit kursierende gefährliche **Vogelgrippe-Virus** hat den Typ H5N1, der Erreger der Spanischen Grippe von 1918/19 hatte den Typ H1N1.

ein vogelspezifisches Influenza-Virus verändern muss, um sich an den Menschen anzupassen, und in welchen Schritten eine solche Anpassung verläuft. Entscheidend ist zunächst einmal seine Fähigkeit, menschliche Zellen infizieren zu können. Das Protein Hämagglutinin auf der Virusoberfläche bindet an einen Rezeptor auf der Zelle und eröffnet so den Zugang in ihr Inneres. Die Anpassung dieses Proteins an verschiedene Zelltypen erfordert offenbar nur geringfügige Veränderungen. Ein Beispiel: Eine bevorzugte Bindung an den vogelspezifischen Rezeptor α2,3-Sialinsäure kann sich bereits verändern, wenn eine einzelne Aminosäure im Hämagglutinin mutiert, sodass nun der menschenspezifische Rezeptor α2,6-Sialinsäure erkannt wird.

Besonders »erfolgreiche« Pandemie-Viren können sehr schwere Krankheiten auslösen

Forscher vermuten, dass bei der Entstehung der drei Pandemie-Erreger des vergangenen Jahrhunderts jeweils zwei Punktmutationen für eine solche Anpassung ausgereicht haben. Das Eindringen in die Zelle allein reicht jedoch nicht aus, um zu garantieren, dass sich ein Virus effizient vermehrt. Influenza-Viren sind wie alle Viren in ihrem Vermehrungszyklus darauf angewiesen, mit zellulären Faktoren, etwa Enzymen, zu wechselwirken. Daher müssen die viralen Proteine, die steuern, wie sich Virusgenome vermehren und neue Viruspartikel entstehen, ebenfalls an die Umgebung der menschlichen Zelle angepasst sein. Das kann geschehen, indem etwa ein Vogelgrippe-Virus mit einem menschlichen Influenza-Erreger rearrangiert wird, also sich die Erbinformation beider miteinander vermischt.

Besonders »erfolgreiche« Pandemie-Viren zeigen eine hohe Pathogenität, also die Fähigkeit, sehr schwere Erkrankungen auszulösen. Sie ist nicht direkt mit der Übertragbarkeit auf den Menschen verknüpft. Um die Ursachen der Pathogenität zu verstehen, hilft uns die Untersuchung des erfolgreichsten uns bekannten Pandemie-Virus, des Erregers der »Spanischen Grippe« von 1918/19. Einzigartig an dieser Epidemie war – im Vergleich zu anderen uns bekannten Grippe-Pandemien – die Tatsache, dass unter den Millionen Todesopfern viele junge Menschen waren. Obwohl die historischen Umstände während des Ersten Weltkriegs die Katastrophe sicherlich begünstigten, liegt die Ursache dafür vor allem bei den speziellen Eigenschaften des Virus selbst.

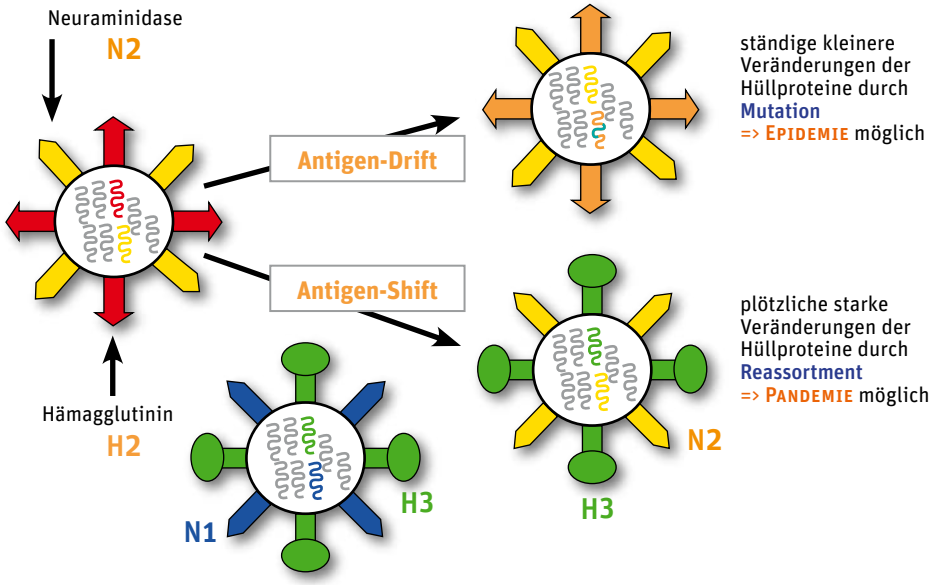
Einzigartige Genkombination

Im Jahr 2005 gelang es amerikanischen Wissenschaftlern, den Erreger aus konserviertem Lungengewebe von Opfern der Spanischen Grippe vollständig zu rekonstruieren. Die Analyse zeigte, dass er zum Typ H1N1 gehörte. Die Wiedererweckung eines entsetzlichen Seuchenerregers im Labor kritisierten damals viele als ein unverantwortliches »Frankenstein-Experiment«. Aus heutiger Sicht ist aber klar, dass diese Analyse wichtige Erkenntnisse über die Biologie von Influenza-Viren bringt, die man auf anderem Weg nicht erhalten könnte. Bereits jetzt beeinflussen die Erkenntnisse unser Verständnis der Entstehung von pandemischen Viren. Im Tierversuch bestätigte sich, dass das Virus von 1918 im Vergleich zu heute kursierenden H1N1-Varianten wesentlich stärkere Symptome hervorruft und häufiger tödlich ist. Es vermehrt sich im Organismus sehr rasch. Bei Mäusen und Affen ruft das Virus von 1918 eine veränderte, überschießende Reaktion des angeborenen Immunsystems hervor, die den Organismus massiv beschädigt. Möglicherweise lässt sich so auch die besonders hohe Todesrate gerade unter jungen Erwachsenen erklären, die ja an sich über ein aktiveres Immunsystem verfügen.

Welche genetische Veränderung machte das Virus von 1918 so gefährlich? Diese Frage versuchen die Forscher zu beantworten, indem sie gezielt Gene des Virus austauschen oder mutieren lassen. Das Ergebnis der Experimente scheint im Hinblick auf zukünftige Pandemien beruhigend: Nicht eine bestimmte Mutation oder ein einzelnes Gen war offenbar entscheidend. Vielmehr beruht die ungewöhnlich hohe Pathogenität dieses Virus auf seiner einzigartigen Genkombination. Tauscht man nämlich nur eines der Gene durch eine andere Variante aus, verliert der Erreger bereits an Gefährlichkeit. Bestimmte Veränderungen führen also offenbar zu Schwachstellen, die durch Veränderungen an anderer Stelle im Virusgenom ausgeglichen werden müssen.

Influenza-Virus – ein variables Ziel für das Immunsystem

Zwei verschiedene Mechanismen tragen dazu bei, dass sich die Oberfläche von Influenza-Viren laufend verändert. Fehler beim Kopieren der Erbinformation bewirken, dass die Oberflächenproteine Hämagglutinin und Neuraminidase vom Immunsystem nicht gut erkannt werden (Antigen-Drift). Außerdem können zwei Influenza-Viren, die die gleiche Zelle befallen, Teile ihrer Erbinformation untereinander austauschen. So können Virustypen mit veränderter Oberfläche entstehen (Antigen-Shift).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: H.-G. KRAUSSLICH UND B. MÜLLER

Die um 1918 zufällig entstandene Kombination seiner Gene war für das Virus also vermutlich so etwas wie ein Lottogewinn – und für die Menschheit ein hoffentlich nicht mehr wiederkehrendes Unglück.

Das Risiko für eine durch H5N1 hervorgerufene Pandemie hängt also vor allem von der Zahl und Kombination der notwendigen genetischen Veränderungen ab. Um dieses theoretisch abzuschätzen, müssten wir die molekularen Grundlagen von Infektiosität und Pathogenität der Influenza-Viren viel besser verstehen, als wir dies im Moment noch tun. Experimente dazu – das hieße hier eine erzwungene Anpassung des Virus an menschliche Zellen im Labor – verbieten sich, da so möglicherweise ein gefährlicher neuer Erreger erzeugt würde. Also müssen wir vor allem genau beobachten, wie sich das Virus verbreitet und überträgt, und dabei jede genetische Veränderung oder Änderungen bei den Übertragungsweisen als Warnsignal deuten.

H5N1 kursiert nun seit mehr als zehn Jahren und hat in diesem Zeitraum nachweisbar genetische Veränderungen durchgemacht. Wie bereits erwähnt, sind in der Regel vermutlich wenige solcher Mutationen ausreichend, um das Virus an die Vermehrung in menschlichen Zellen anzupassen. Angesichts seiner Variabilität, seiner schnellen Vermehrung und weiten Verbreitung ist es wenig wahrscheinlich, dass solche Mutationen noch nie aufgetreten sind. Derartige Viren haben sich bisher jedoch offenbar nicht durchgesetzt. Mutationen auf dem Weg zur Anpassung an den Menschen bringen also anscheinend für H5N1 auch Nachteile mit sich. Man kann daher argumentieren – und einige Wissenschaftler tun dies –, dass H5N1 heute eine geringe Gefahr für den Menschen darstellt. Denn der Erreger hatte reichlich Gelegenheit, sich an den Menschen anzupassen, hat das aber bisher trotz einiger hundert erwiesener Übertragungsereignisse nicht geschafft.

Gefahr von unverdächtigen Viren?

Leider helfen uns Aussagen über Wahrscheinlichkeiten auch hier nur bedingt weiter. »Der Krug geht so lange zum Brunnen, bis er bricht«, heißt es. Bei H5N1 würde möglicherweise bereits ein einmaliges Ereignis genügen, um die Katastrophe auszulösen. Auch im Fall der verheerenden Aids-Pandemie war es wohl ein einzelnes Ereignis, das zu einem bestimmten Zeitpunkt eintrat und dann die Seuche auslöste – obwohl dies sicherlich auch vorher und nachher möglich gewesen wäre. Vermutlich haben in den letzten Jahrhunderten eine ganze Reihe von Übertragungen von Immundefizienz-Viren des Affen auf den Menschen stattgefunden – wahrscheinlich viel mehr, als man heute belegen kann. Aber letztlich hat wohl nur eine Übertragung zu HIV-1 Typ M, dem wesentlichen Erreger der heutigen Aids-Pandemie, geführt. Natürlich beruhigt das Ausbleiben einer Anpassung von H5N1 an den Menschen in gewisser Weise, ausschließen lässt sich die mögliche Anpassung deswegen aber nicht.

Ob es H5N1 je gelingt, sich zu einem Pandemie-Virus zu wandeln, ist für die Beantwortung unserer ursprünglichen Frage allerdings gar nicht entscheidend. Möglicherweise entsteht der nächste Pandemie-Erreger nämlich

Einige Forscher glauben, dass das H5N1-Virus möglicherweise nur noch eine geringe Gefahr für die Menschheit darstellt

aus einer Virusvariante, an die wir heute noch gar nicht denken. In den vergangenen Jahren gab es eine Reihe von Ausbrüchen der Vogelgrippe, verursacht durch andere Influenza-Viren. Auch hier kam es vereinzelt zur Übertragung auf den Menschen; zum Beispiel starb 2003 während einer H7N7-Epidemie in den Niederlanden ein Tierarzt an den Folgen einer Ansteckung. Die Tatsache, dass H5N1 als Tierseuchenerreger eine erheblich größere Bedeutung hat als die anderen Typen, besagt noch nichts Eindeutiges über seine mögliche Gefährlichkeit für den Menschen. An den Pandemien des vergangenen Jahrhunderts war jedenfalls keine der für Vögel oft hochpathogenen H5- oder H7-Varianten beteiligt.

Was also sollen wir tun? Die Entstehung eines neuen Pandemie-Erregers können wir nicht verhindern. Entscheidend ist demnach, die Verbreitung und Übertragung der verschiedenen Influenza-Varianten genau zu beobachten und Veränderungen über die Zeit als Warnsignal zu betrachten. Dadurch sollte es möglich sein, den Beginn einer möglichen Pandemie frühzeitig zu erkennen und entsprechend schnell zu reagieren. Das Global Influenza Surveillance Network der Weltgesundheitsorganisation WHO hat diese Aufgabe übernommen. Das Beispiel von Sars, dem Schweren Akuten Respiratorischen Syndrom, hat seit dem ersten Auftreten der Infektionskrankheit in China 2002 gezeigt, wie erfolgreich internationale Zusammenarbeit und moderne Forschungsmethoden bei der Eindämmung neu auftretender Infektionserreger sein können. Allerdings war die Situation in diesem Fall einfacher, da Sars-Patienten vor allem nach Ausbruch der Krankheit infektiös sind.

Im Gegensatz dazu wird das Influenza-Virus wie viele andere Viren bereits deutlich vor Auftreten von Symptomen übertragen, was die Eindämmung schwieriger macht. Aber auch hier sind offene internationale Kooperation und eine gute Vorbereitung ausschlaggebend. Unser Vorbereitungsstand ist leider trotz aller wissenschaftlichen Erkenntnisse und jahrelanger Debatten noch unzureichend. So sollten zum Beispiel dringend verbesserte Systeme zur raschen Impfstoffproduktion in großem Maßstab entwickelt werden. Bei aller berechtigten Sorge über eine mögliche Influenza-Pandemie sollten wir außerdem die normale Grippe nicht vergessen. »Normal« ist diese Grippe nämlich nur in dem Sinn, dass es weder Übertragung der Vogelgrippe noch Pandemie ist – die Symptome sind jedoch ebenfalls gravierend. In einer durchschnittlichen Grippesaison sterben in Deutschland etwa 15 000 Menschen an den Folgen. Obwohl eine Grippe-Impfung zur Verfügung steht und jeden Herbst von allen Hausärzten angeboten wird, nehmen zu wenige die Gelegenheit wahr, sich aktiv zu schützen. Offenbar glauben viele, eine normale Grippe sei im Gegensatz zur Pandemie-Grippe keine gefährliche Erkrankung. Die Impfrate, die unter den besonders gefährdeten Personen über 60 Jahre während des Höhepunkts der öffentlichen Pandemie-Diskussion 2005/06 von 45 Prozent auf 59 Prozent angestiegen war, sank im Folgejahr schon wieder auf 48 Prozent.

Die Stunde ist ungewiss

Die im Titel gestellte Frage »Wo bleibt die nächste Pandemie?« lässt sich auch weiterhin nur teilweise beantworten: Die Pandemie kommt zwar gewiss, doch ist ungewiss, wann sie kommt. Ein neuer Influenza-Erreger bedroht uns real, und wir müssen uns auf diese Situation angemessen vorbereiten. Ob der Erreger H5N1 heißen wird, wissen wir nicht. Dass wir sowohl in der Vorbereitung als auch im öffentlichen Verständnis in Sachen Influenza noch einiges nachzuholen haben, steht dagegen fest. Dabei wird am Thema Influenza-Pandemie deutlich, wie eine konkrete Gefahr einerseits und ihre Wahrnehmung durch die Allgemeinheit andererseits divergieren.

Das hat verschiedene Ursachen. Unsichtbare und schwer kontrollierbare Gefahren – wie etwa Infektionserreger – wecken oft das öffentliche Interesse und stoßen Diskussionen an. Natürlich reagieren die Medien prompt auf solche Prozesse und lassen die Debatte eskalieren. Ärzte und Wissenschaftler tragen dazu bei: aus echter Besorgnis, aber auch aus persönlicher Eitelkeit oder um »ihr Thema« publik zu machen. So wird der öffentliche Diskurs vom eigentlichen Sachverhalt entkoppelt. Auch verflacht der Neuigkeitswert rapide. Kein mit noch so viel Rummel bedachtes Thema kann das Medieninteresse über längere Zeit wachhalten, ohne dass »etwas passiert«. Wer auf Grund dramatischer Berichte über grippeverseuchte »Todes-Katzen« sein Haustier über mehrere Monate sorgenvoll beobachtet hat, aber bemerkte, dass dieses von der Situation unbeeindruckt blieb, dem erscheinen die Warnungen als falscher Alarm.

Im Interesse der öffentlichen Gesundheit sollten diese Mechanismen durchbrochen werden. Das Influenza-Virus und die Pandemie-Gefahr werden uns weiter begleiten. Weder allgemeine Hysterie noch ein Ignorieren des Problems verbessern unsere Chancen, dieser Gefährdung angemessen zu begegnen – eine genaue Beobachtung der Entwicklung von Seuchen, bessere Strategien zu ihrer Eindämmung sowie eine sachliche und verständliche Information der Öffentlichkeit dagegen schon. ◁

Die Biologin **Barbara Müller** arbeitet als Gruppenleiterin in der Abteilung Virologie am Universitätsklinikum Heidelberg. Ihr Arbeitsschwerpunkt ist die Untersuchung der Interaktionen zwischen HIV und dessen Wirtszelle. **Hans-Georg Kräusslich** ist Professor für Virologie und Direktor der virologischen Abteilung der Universität Heidelberg. Er ist Sprecher des Sonderforschungsbereichs »Kontrolle tropischer Infektionskrankheiten«, des DFG-Schwerpunktprogramms »Dynamik zellulärer Membranen und ihre Ausnutzung durch Viren« sowie des Exzellenzclusters »Cellular Networks«.

The next influenza pandemic: can it be predicted? Von J.K. Taubenberger et al. in: Journal of the American Medical Association, Bd. 297(18), S. 2025, 2007

Lessons from the 1918 influenza. Von M. Zambon in: Nature Biotechnology, Bd. 25(4), S. 433, 2007

A two-amino acid change in the hemagglutinin of the 1918 influenza virus abolishes transmission. Von T. M. Tumpey et al. in: Science, Bd. 315(5812), S. 655, 2007

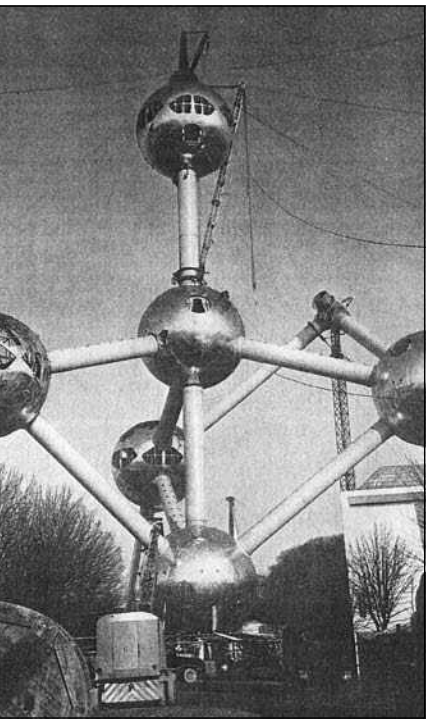
What can we learn from reconstructing the extinct 1918 pandemic influenza virus? Von P. Palese et al. in: Immunity, Bd. 24(2), S. 121, 2006

Lessons learned from reconstructing the 1918 influenza pandemic. Von A. Garcia-Sastre et al. in: Journal of Infectious Diseases, Bd. 194, Supplement 2, S. 127, 2006

Are we ready for pandemic influenza? Von R. J. Webby et al. in: Science, Bd. 302(5650), S. 1519, 2003

www.who.int/topics/influenza/en

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/943422.



Montage des Atomiums zur Weltausstellung

»Im Dienste des Menschen«

»Am 17. April 1958 öffnet die Weltausstellung 1958 ihre Tore … ›Im Dienste und zum Nutzen der Menschheit‹ sind Thema und Richtschnur dieser wohl großartigsten Gesamtschau, die je geschaffen wurde … Nach dem verpflichtenden Thema der ›Expo 58‹ soll jedes Land von sich aus herausfinden, wie das Wohlergehen des Menschen in allen seinen Tätigkeiten, vom wirtschaftlichen wie vom sozialen, vom kulturellen als auch vom geistigen Standpunkt am besten gezeigt werden kann. Jedes Teilnehmer-Land soll den eigenen Geist seiner Nation, seine eigene Lebensanschauung und seine Ansicht vom Leben in der menschlichen Gemeinschaft herausstellen.« *Orion, Jg. 13, Heft 4, S. 265, 1958*

Natur des Tungusker Meteoriten enthüllt

»Am 30. Juni 1908 hat sich nördlich der Steinigen Tunguska, einem rechten Nebenfluss des Jenissei, im Gebiet der sibirischen Taiga, eine Naturkatastrophe ereignet, die man auf Grund der gemachten Beobachtungen mit dem Niedergang eines Riesenmeteoriten in Zusammenhang brachte … Nach einer Mitteilung des Meteoritenkomitees in Moskau sind im Jahre 1957 die von späteren Expeditionen … mitgebrachten Bodenproben mikroskopisch untersucht worden mit dem Ergebnis, daß darin… Kügelchen mit 30 bis 60 µ im Durchmesser gefunden wurden. Es handelt sich um meteoritische Substanz und zwar um gediegenes Eisen mit dem bei Meteoriten üblichen Prozentsatz von Nickel und Kobalt.« *Die Umschau, Jg. 58, Nr. 7, S. 216, 1. April 1958*

Ältestes Lebewesen der Welt

»Bis 1954 galt der Mammutbaum Sequoia gigantea … als ältestes lebendes Wesen unserer Erde überhaupt … Nun kommt die Kunde, daß E. Schulman in den im Regenschatten der Sierra Nevada gelegenen White Mountains nicht einmal 100 km ostwärts vom Sequoia-Nationalpark in etwas über 3000 m Seehöhe Kiefern entdeckt hat, welche bis zu 4200 Jahre alt, also noch volle 1000 Jahre älter sind als die Mammutbäume … Die Borstenkiefer Pinus aristata … wächst an der oberen Baumgrenze und wird nur wenig über 10 m hoch; die Bäume der höchsten Altersklasse sind … am größeren Teil ihres Umfangs seit über 1000 Jahren abgestorben und von Rinde entblößt. Oft ist es nur ein einziger Ast, der das Leben des Individuums fortsetzt.« *Die Umschau, Jg. 58, Nr. 8, S. 248, 15. April 1958*

Intelligentes Leben auf dem Mars?

»Herr Lowell rechnet jetzt aus, daß von dem ›im Durchschnitt‹ bis 36° Breite reichenden Südpolfleck genug Wasser komme, um in den (zuvor leeren) Marskanälen einen Wasserstand von wenigstens 75 cm, wenn nicht das Doppelte oder Dreifache, zu erreichen … Es müßte daher ein sehr beträchtliches Gefälle von der Polarzone zum Äquator und über diesen hinaus bestehen oder die Wassermassen müßten, den Mars ganz eben angenommen, künstlich weitergeleitet werden … Auf der einen Seite macht man also die hypothetischen Marsbewohner in ihren Bedürfnissen menschenähnlich, andererseits muß man ihnen übermenschliches Wissen und Können zuschreiben.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, Jg. 23, Nr. 17, S. 220, 23. April 1908*

Beim Telefonieren beide Hände frei

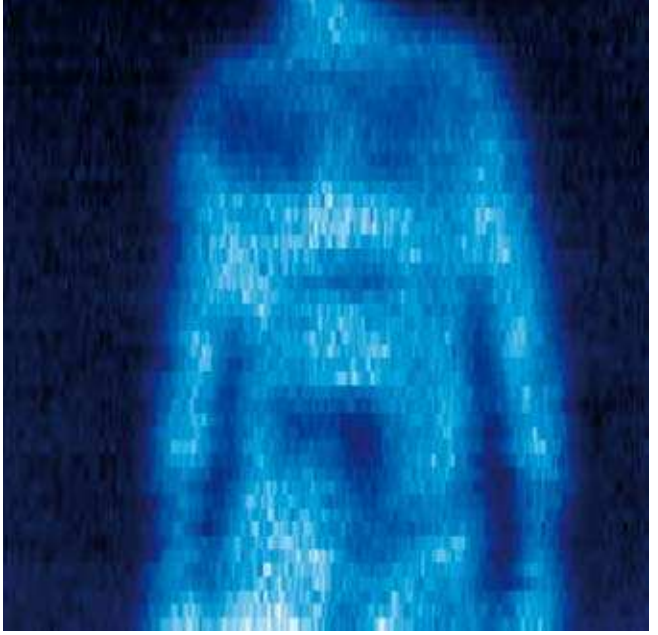
Spritztour durchs Eis

»Dr. Henryk Arctowski ist der erste gewesen, der daran gedacht hat, einen Automobilschlitten für die Polarforschung zu verwenden … In allen bisher gebauten Motorschlitten bestand die eigentliche, die Vorwärtsbewegung bewirkende Maschine aus einer breiten Rolle, die mit Zacken versehen waren, die in den Schnee eingriffen … Bei dem belgischen Schlitten sind diese Zacken beweglich und schlagen erst im Augenblicke, wo sie mit der Schneefläche in Berührung kommen, mit der grösstmöglichen Kraft in den Boden ein, um bald darauf wieder in die Rolle zurückzufallen, wobei sie gleichzeitig automatisch gereinigt werden.« *Die Welt der Technik, Jg. 1908, Nr. 5, S. 1, 15. April 1908*

Praktische Freisprechanlage

»Während man gemäß den bestehenden Einrichtungen beim Gebrauch des Fernhörers denselben in der Hand halten muß, ermöglicht die abgebildete Vorrichtung, an welcher der Fernhörer angehängt wird, beide Hände freizuhalten … Da der Fernhörer an einem, am Vorderteile des Halters angebrachten Haken hängt, oder wenn es sich um Verwendung eines Mikrotelephons in Verbindung mit einem Tischapparat handelt, am vorderen Hakenende festgemacht werden kann, so hat man nur das Ohr je nach Bedürfnis leicht oder fest an den Hörer anzulegen, ohne den Apparat selbst in die Hand nehmen zu müssen.« *Der Elektrotechniker, Jg. 27, Nr. 7, S. 88, 10. April 1908*

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio



THRLIVISION

Vorstoß in die TERAHERTZLÜCKE

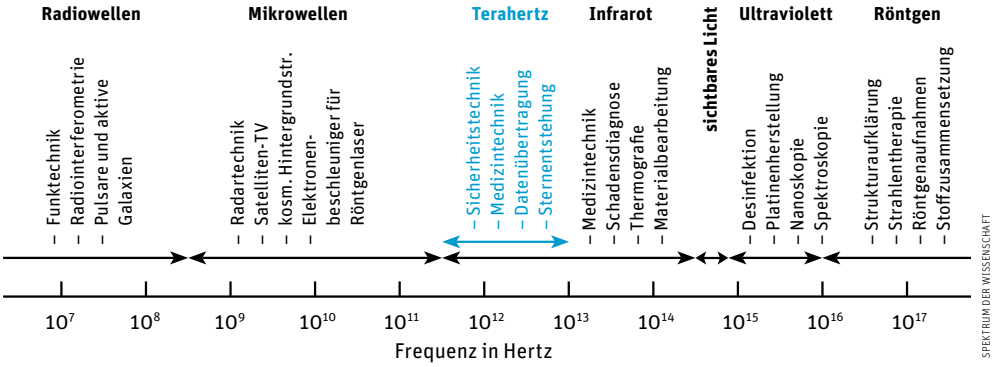
Lange Zeit waren Wissenschaftler nahezu blind für Terahertzstrahlen, und es fehlten auch geeignete Sender. Doch nun wird diese Terra incognita systematisch erforscht.

Von Gerhard Samulat

Lange Zeit klaffte eine »Lücke« im elektromagnetischen Spektrum. Keine wirklich physikalische Kluft, vielmehr fehlten schlicht die technischen Möglichkeiten, den Frequenzbereich zwischen 0,3 und etwa 10 Terahertz (Billionen Schwingungen pro Sekunde) genauer zu erkunden. Denn bis vor Kurzem existierten für diesen Spektralbereich weder brauchbare Quellen für definierte Wellenlängen noch geeignete Empfänger. Die Fachwelt sprach daher von einer Terahertzlücke.

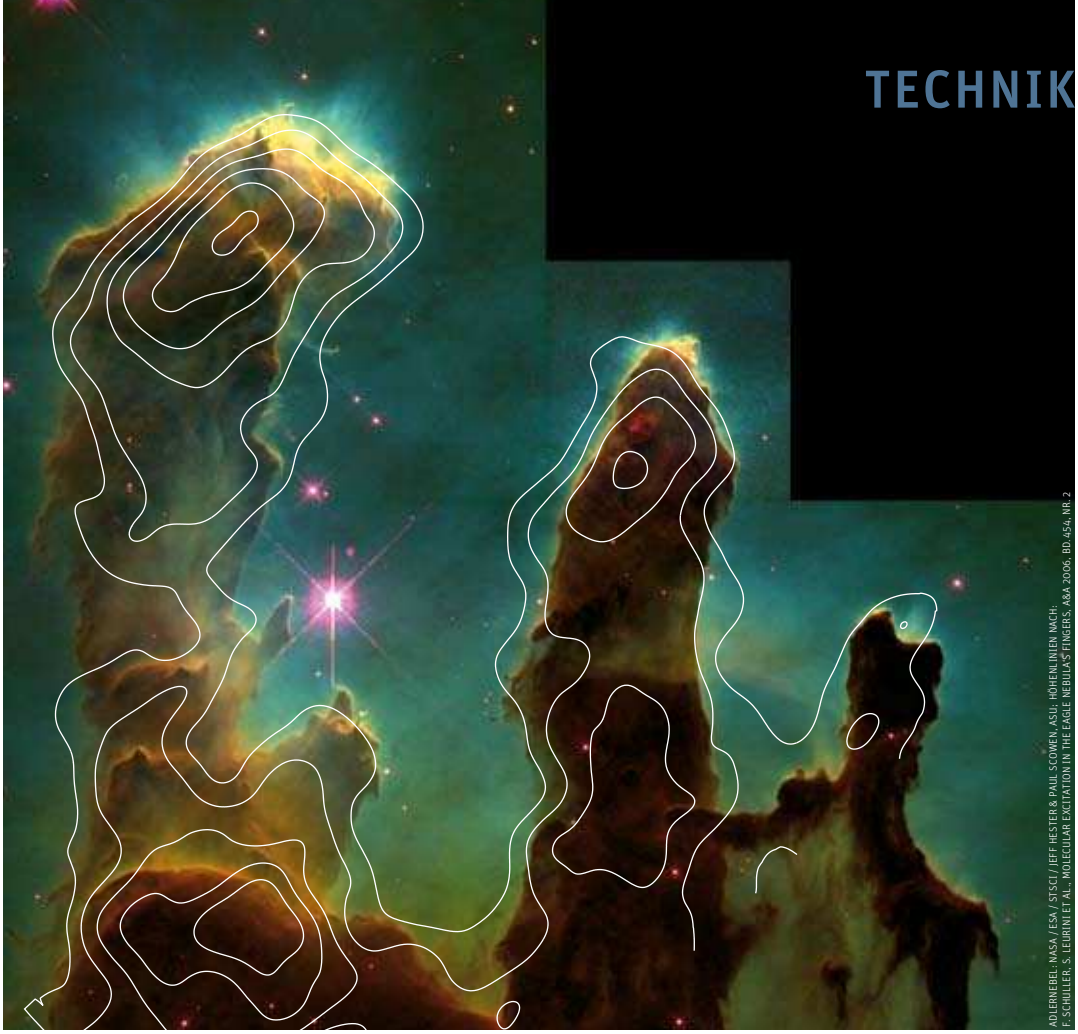
Zwar strahlt jedes heiße Objekt, ob es nun die Sonne ist oder eine glühende Herdplatte, gemäß der Planck'schen Strahlungsformel auch in diesen Wellenlängen Energie ab. Doch die Leistungsdichte ist meist zu klein, um Laborversuche anstellen zu können. Unser Zentralgestirn beispielsweise verfügt im Terahertzbereich nur über ein Zwanzigtausendstel der Leistungsdichte, die es im Sichtbaren ausstrahlt. Zudem ist die natürliche Wärmestrahlung nicht kohärent: »Berge« und »Täler« der emittierten Wellen – Wissenschaftler sprechen von Phasen – sind also zeitlich und räumlich nicht aufeinander abgestimmt, was die Interpretation von Experimenten mit natürlicher Terahertzstrahlung außerordentlich schwierig macht.

Dabei bieten die auch Submillimeterstrahlung genannten Terahertzwellen faszinierende An- und Ausblicke. Plastik und Kunststoffe



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Mit Macht nimmt Terahertzstrahlung ihren Platz in der ehemaligen technischen »Lücke« ein. In der Abbildung sind Stichworte zu einigen Anwendungen verschiedener Frequenzbereiche genannt. (Für die Abgrenzung der Frequenzbereiche existieren unterschiedliche Konventionen.)



ADLERNEBEL: NASA / ESA / STSCI / JEFF HESTER & PAUL SCOWEN, ASU; HÖHENLINIEN NACH: F. SCHULLER, S. LEURINI ET AL., MOLECULAR EXCITATION IN THE EAGLE NEBULA'S FINGERS, A&A 2006, BD. 454, NR. 2

Schon jetzt findet Terahertzstrahlung viele Anwendungen. Mit Submillimeter-Spektroskopie rückten Astronomen des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie dem Adlernebel auf den Leib, einem berühmten Sternentstehungsgebiet (nebenstehendes Bild). Die Isolinien (nachgezeichnet auf Basis der Originalpublikation von Frédéric Schuller et al.) basieren auf Messungen eines Rotationsübergangs von Kohlenmonoxid. Das Bild auf der linken Seite zeigt die Terahertzaufnahme eines bekleideten Mannes, der eine Waffe unter dem Gürtel trägt.

sind transparent für dieses »Licht«, das im Spektrum zwischen fernem Infrarot und Mikrowellen liegt. Auch Textilien, Papier, Keramiken oder Mauerwerk werden im Terahertzlicht durchsichtig. Mit Terahertzwellen lassen sich chemische Verbindungen analysieren und Biomoleküle zu charakteristischen Schwingungen anregen. Ebenfalls machbar scheint die Übertragung von Daten mit deutlich höherer Informationsdichte als beim heute gängigen Wireless Local Area Network (WLAN) oder bei Bluetooth-Verbindungen. Nicht zuletzt erlauben Terahertzwellen einen Einblick in die Vorgänge, die bei der Entstehung von Sternen im Universum ablaufen.

Derzeit existieren mindestens zwei viel versprechende Ansätze, um die Terahertzlücke allmählich zu schließen und die gewünschte Strahlung in ausreichender Stärke und Güte zu erzeugen. Zum einen spezialisieren sich Elektronenbeschleuniger wie das Berliner Synchrotron Bessy oder der Karlsruher Beschleuniger Anka zunehmend darauf, kohärente Terahertzstrahlung zu erzeugen. »Am Anfang bekamen wir für die Nutzung von Bessy zwar Messzeiten zugewiesen, die typischerweise zwischen dem 30. April und dem 1. Mai lagen«, erinnert sich Heinz-Wilhelm Hübers an die Anfänge. »Doch mittlerweile«, so der Leiter der Terahertz- und Infrarotsensorik beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin-Adlershof, »bietet Bessy ein- bis zweimal im Jahr einen Low-α-Modus an.« In diesem Betriebszustand sind die Elektronenpakete im Beschleuniger räumlich stark konzentriert, was unter anderem zu hoher Abstrahlungsintensität im Terahertzbereich führt.

Handlich oder riesenhaft?

Darüber hinaus stehen in Labors auf der ganzen Welt mittlerweile zum Teil recht handliche Anlagen, aus denen Wissenschaftler kurze Terahertzpulse aufblitzen lassen. Die technische Grundlage solcher Apparaturen sind meist starke Dioden-, Femtosekunden-, Freie-Elektronen- oder sogar Quanten-Kaskaden-Laser. Während Kreisbeschleuniger mit Umfängen von bis zu mehreren hundert Metern sich vor allem für die Grundlagenforschung anbieten, denken die Entwickler von Tischgeräten deutlich stärker an technische Anwendungen. Dazu gehören medizinische Geräte zur Krebsvorsorge ebenso wie die Sicherheitsüberwachung von Flugpassagieren, aber auch die ultraschnelle, kabellose Datenübertragung oder die Qualitätskontrolle in der Produktion von Massengütern.

»Wir arbeiten beispielsweise mit dem Süddeutschen Kunststoffzentrum SKZ zusammen«, berichtet Martin Koch, Leiter der Ar-

In Kürze

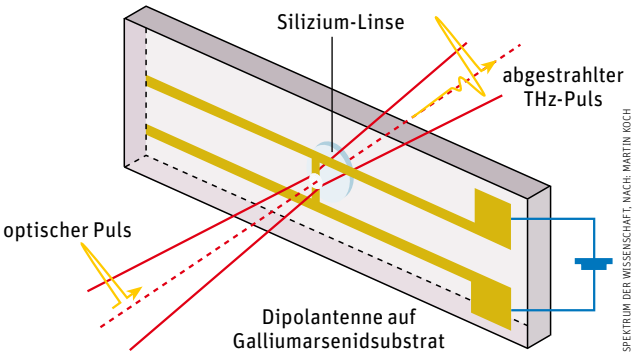
- Bislang gab es **kaum brauchbare Sender oder Empfänger für Terahertzwellen**. Deswegen wird dieser Teil des elektromagnetischen Spektrums erst in den letzten Jahren wissenschaftlich und technisch genutzt.
- Zunehmend aber erkunden Forscher und Ingenieure diese **Terra incognita**. Sowohl mit Teilchenbeschleunigern als auch mit Hochleistungslasern lassen sich Terahertzstrahlen nun auf effektive Weise erzeugen.
- Sie eignen sich für so **unterschiedliche Aufgaben wie die Personenkontrolle** an Flughäfen, die Qualitätskontrolle in der Industrieproduktion oder die Beantwortung der Frage, wie Sterne entstehen.

Erzeugung von Terahertzstrahlung

Beschleuniger: Es gibt mittlerweile mehrere effektive Verfahren, um hochwertige Terahertzstrahlung für Experimente zu erzeugen. Experten am Elektronenbeschleuniger Bessy in Berlin-Adlershof gelang es vor einiger Zeit, die mit nahezu Lichtgeschwindigkeit umlaufenden Teilchenpakete – im Fachjargon »Bunches« – auf engstem Raum zusammenzuquetschen. Nun enthält das Synchrotronlicht, das die geladenen Partikel bei jedem Umlauf abstrahlen, einen reproduzierbar starken Terahertzanteil. Dafür erhielten die Bessy-Forscher und das ebenfalls beteiligte DLR im Jahr 2003 den Innovationspreis Synchrotronstrahlung, über dessen Vergabe namhafte Wissenschaftler des »Vereins der Freunde und Förderer von Bessy« entscheiden. Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt übernimmt dieses Verfahren nun, um an der im Bau befindlichen Metrology Light Source – ebenfalls in Berlin-Adlershof – die Eigenschaften der Terahertzstrahlung genau zu charakterisieren und Standards für Industrie und Forschung zu entwickeln.

Freie-Elektronen-Laser sind Linearbeschleuniger. Folglich gibt jedes beschleunigte Elektronenpaket nur einen einzigen Terahertzpuls ab. Dies schließt metrologische Experimente aus, weil jeder Bunch nur ein einziges Mal an den Messeinrichtungen vorbeifliegt, sich also bei jedem Versuch die exakten Bedingungen verändern. Da die emittierte Strahlung aber Aussagen über die Verteilung der Elektronen im jeweiligen Bunch zulässt, entwickeln Physiker Spezialgeräte für den Freie-Elektronen-Laser Flash am Hamburger Desy, mit denen sich Länge und Struktur der Elektronenpakete analysieren lassen. Ziel ist eine verbesserte Güte der Synchrotronstrahlung, was wiederum genaueren Experimenten dient.

Laborgeräte: Für Laborversuche eignen sich Femtosekunden-, Dioden- oder Quantenkaskadenlaser. Um einen Terahertzpuls zu erzeugen, schießen Experimentatoren beispielsweise mit Femtosekundenlasern auf fotoleitende Dipolantennen, an denen



Mit fotoleitenden Dipolantennen werden Terahertzpulse erzeugt.

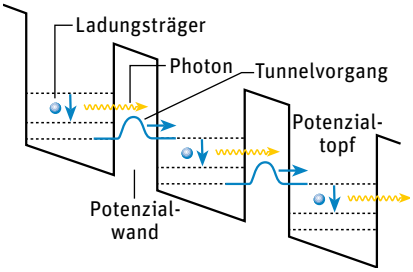
beitsgruppe Terahertz-Systemtechnik des Instituts für Hochfrequenztechnik an der TU Braunschweig (Foto rechts unten). Für das SKZ, ein Forschungszentrum der Kunststoffindustrie, erprobt der Physikprofessor neue Messverfahren. Dabei verraten charakteristische Reflexions- oder Absorptionsmuster, ob Additive, die zur Veredelung von Kunststoffen eingesetzt werden, homogen in der Rohmasse verteilt sind oder ob darin störende Luftblasen, Einschlüsse oder auch Fremdmaterialien vorhanden sind. »Hier besitzt Terahertzstrahlung ein Alleinstellungsmerkmal«, meint der Braunschweiger Wissenschaftler. »Weder mit Infrarot noch mit sichtbarem Licht komme ich durch die Schmelze hindurch, und Mikrowellen haben nicht die notwendige Ortsauflösung.« Plastik ist für Submillimeterwellen jedoch meist transparent, während Metalle oder Wasser die Strahlung absorbieren und daher im Terahertzbereich undurchsichtig bleiben.

Für Koch sind Aufgaben aus der industriellen Qualitätskontrolle daher die naheliegendste Anwendung. Sind Stoffzusammensetzungen stets identisch? Sieht jedes Bauteil aus der Massenherstellung genauso aus wie jedes andere? Mit Skepsis betrachtet er hingegen medizintechnische Terahertzanwendungen, auf die sich in den letzten Jahren viele Hoffnungen richteten. »Was könnte ich damit denn beobachten, was ich nicht auch auf andere Weise sehe?«, fragt er, wenn er hört, was findige Firmen alles anbieten. Diagnosegeräte für Hautkrebs zum Beispiel: »Die Hautveränderungen kann jeder Arzt meist auch so erkennen«, glaubt Koch, »dafür braucht er in der Regel keine teuren Anlagen.«

Ähnlich kritisch sieht er es, wenn – wie vor einiger Zeit – eine Meldung durch die Gazetten geistert, die die Vorzüge von zahnmedizinischen Terahertzgeräten beim Aufspüren verdeckter Karies preist. Ein kranker Zahn im Gebiss eines Patienten lässt sich damit nämlich noch lange nicht ausfindig machen. »Das Bild zeigte einen entwässerten Dünnschnitt durch einen bereits entnommenen Zahn«,

Ausschnitt einer Panoramaaufnahme des Teilchenbeschleunigers Bessy

BESSY / BILDWERK / BERS / JANKOWIAK



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Quantenkaskade: Ladungsträger tunneln von Potenzialtopf zu Potenzialtopf

eine Spannung anliegt. Eine Femtosekunde ist der billiardste Teil einer Sekunde – in dieser Zeit kommt ein Lichtstrahl gerade einmal 0,3 millionstel Meter weit, das ist weniger als die Dicke eines Haares. Die kürzer als 100 Femtosekunden andauernden Blitze treffen auf eine Lücke zwischen zwei mikroskopisch kleinen Goldstreifen, die auf einem Gallium-Arsenid-basierten Trägermaterial aufliegen. In diesem Halbleitermaterial erzeugen sie Elektron-Loch-Paare, die von der an den Goldstreifen angelegten Spannung auseinandergerissen werden. Nach den Gesetzen der Elektrodynamik löst deren beschleunigte Bewegung einen Terahertzpuls aus. Ähnlich funktioniert der Empfänger.

Kostengünstiger ist die Erzeugung von Terahertzwellen durch das Überlagern von Licht zweier leistungsstarker Diodenlaser leicht unterschiedlicher Frequenz. Dazu eignen sich beispielsweise Distributed-Feedback-Laser (DFB), deren aktives Material zur Erhöhung der Strahlleistung und zur Wellenlängenselektion gitterartig strukturiert ist. Das resultierende Laserlicht ist eine sinusförmige Schwebung. Mit Hilfe fotoleitender Dipolantennen lassen sich diese in kontinuierliche Terahertzwellen umwandeln.

Eine weitere Option sind Quantenkaskadenlaser. Sie bestehen abwechselnd aus vielen hauchdünnen Lagen aus Halbleitermaterialien und Barriereschichten. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik bilden sich in den Halbleiterschichten bei geeigneter Wahl der Schichtdicken so genannte Potenzialtöpfe aus, in denen Ladungsträger ausschließlich diskrete Energien einnehmen können – ähnlich wie in einem Atom. Durch Anlegen einer Spannung wird dann erreicht, dass sich die energetischen Lagen der Potenzialtöpfe zueinander verschieben. Liegt ein Potenzialtopf energetisch höher als ein benachbarter, kann ein Ladungsträger von einem niedrigen Energieniveau des ersten Topfs in ein hohes Niveau des zweiten tunneln. Von diesem Niveau fällt er dann wieder auf ein niedriges und sendet dabei ein Photon aus.

Folgen viele solcher Übergänge aufeinander, entstehen die Ladungsträgerkaskaden, die dem Laser seinen Namen gaben. Durch geeignete Wahl der Schichtdicken, der Materialien und der Spannungen lässt sich Terahertzstrahlung mit diesem Verfahren sehr effektiv erzeugen. Häufig müssen die Geräte aber stark gekühlt werden.

verrät Koch, »ein solches Gerät wird man nie in einer Zahnarztpraxis stehen sehen.« Das Problem: Terahertzstrahlung dringt teilweise nur wenige zehntel Millimeter tief in Haut oder Knochen ein. Da hilft es auch nichts, dass Terahertzwellen im Gegensatz zu Röntgenstrahlen als unschädlich für Organismen gelten. Ihre vergleichsweise energiearmen Photonen können nämlich keine Elektronen aus Atomen oder Molekülen herausschlagen, sie also nicht ionisieren.

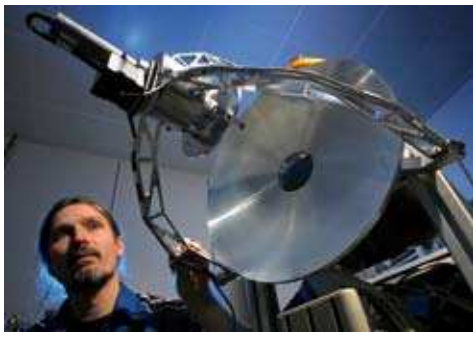
Shampoo, Limonade oder Sprengstoff?

Stattdessen bietet sich die Strahlung für Kontrollen an Flughäfen oder in anderen sicherheitsrelevanten Zonen an. Wachpersonal könnte künftig aus der Ferne sehen, ob Verdächtige gefährliche Gegenstände wie Messer oder Revolver unter der Kleidung verbergen, selbst wenn die Waffen nicht aus Metall sind. Im Labor von DLR-Mann Hübers steht ein solches Gerät, für das er im Jahr 2007 auch den Sonderpreis »Airport of the Future« der Lilienthal-Preis-Stiftung und der Berliner Flughäfen erhielt. Selbst Sprengstoffe oder Drogen ließen sich mit derartigen Geräten nachweisen, berichtet er. Plastikflaschen beispielsweise »sähe« man an, ob sie Shampoo, Limonade oder flüssigen Sprengstoff enthalten. »Wir können in wenigen Sekunden auf eine Entfernung von knapp 20 Metern erkennen, ob jemand irgendetwas Merkwürdiges mit sich herumträgt«, erklärt er. Ähnliche Detektoren werden bereits an einigen Flughäfen weltweit als Portalscanner getestet, weiß Hübers: »Diese Geräte arbeiten allerdings nur mit 60 oder 90 Gigahertz.« Die Reichweite solcher Zentimeterwellen ist aber viel geringer, zudem erlauben sie nur eine schlechte Auflösung. Erst ab 300 Gigahertz ließen sich, so Hübers, »einigermaßen handliche Optiken bauen«, die auch aus der Ferne zum Einsatz kommen können.

Allerdings bringen Kritiker ethische Bedenken gegen diese Art der Durchleuchtung

MIT FRDL. GEN. VON MARTIN KOCH, TU BRAUNSCHWEIG

Martin Koch an einem Laser-Versuchsaufbau. Gemeinsam mit Thomas Kleine-Ostmann war ihm im Jahr 2004 eine weltweite Premiere gelungen, nämlich die erste Informationsübertragung mit Terahertzstrahlen.



DPA, JAN-PETER KASPER

Auch andernorts wird der Terahertzspektralbereich intensiv erforscht. Diese Terahertzkamera am Jenaer Institut für Photonische Technologien (IPHT) ist für Filmaufnahmen auf die Distanz von fünf Metern ausgelegt und soll für Sicherheitsanwendungen zum Einsatz kommen. »Sie ist ähnlich wie ein kleines Radioteleskop aufgebaut«, so IPHT-Forscher Torsten May (Bild). »Der große Hauptspiegel wird durch einen kleinen Sekundärspiegel ergänzt, der als Scanner benutzt wird.« Der goldene Zylinder (oberer Bildteil, größtenteils verdeckt) ist der eigentliche Detektor: ein supraleitender Strahlungssensor.

vor, bei der Menschen auf den Bildschirmen gleichsam nackt dastehen. Darum habe die Auftraggeberin des Projekts, eine Kommission der Europäischen Union, auch die Mitwirkung eines entsprechenden Beraters gefordert. Martin Koch von der TU Braunschweig geht deswegen davon aus, dass die Sicherheitsbehörden den Überwachungsvorgang automatisieren werden: »Da wird kein Operateur mehr sitzen, der Ihnen unter die Wäsche schaut.« Schlägt der Scanner an, wird die betreffende Person aber vom Wachpersonal zur Seite gebeten. Dann wird sie noch genauer inspiziert, als wenn nur der Metalldetektor reagiert hat, den jeder Fluggast ohnehin passieren muss.

Beide Wissenschaftler sehen in Terahertzscannern daher lediglich ein zusätzliches Hilfsmittel für die Personenkontrolle. Darauf verzichten werden die Flughafenbetreiber aber wohl kaum. »Es gibt jedenfalls einen signifikanten Markt für Terahertzsysteme, um zusätzliche Informationen über Gepäckstücke und Personen zu gewinnen«, resümiert Koch.

Wenn es um weitere Anwendungen geht, sprudeln die Ideen aus dem Braunschweiger Physiker nur so heraus. Konkret vor Augen hat Koch beispielsweise die drahtlose Datenübertragung über ein ultraschnelles WLAN. Ein entsprechendes Projekt von Koch und seinem ehemaligen Mitarbeiter Thomas Kleine-Ostmann von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt stellte der Münchner Physik-Nobelpreisträger Theodor Hänsch sogar in einem Buch vor: als eines von »100 Produkten der Zukunft«. Trägerfrequenzen ab 300 Gigahertz könnten binnen weniger Sekunden den Inhalt einer DVD durch die Luft übermitteln. Bei diesen Wellenlängen fänden sich auch freie Stellen im ansonsten dicht besetzten Frequenzdschungel.

Start ins Zeitalter der TV-Terawelle

»Derzeit belächelt Sie die Hälfte der Zuhörer zwar noch, wenn Sie auf Workshops und Seminaren ein Terahertzkommunikationssystem vorschlagen«, so der Physiker. »Aber in 10 bis 15 Jahren werden wir diese Technik haben, da wette ich drauf!« Er glaubt fest an den weiterhin exponentiellen Anstieg der Leistungsdichte bei drahtloser Datenübertragung. Analog zum Moore'schen Gesetz, das die rasante Zunahme der Dichte von integrierten Schaltkreisen auf einem Computerchip beschreibt, hat sich auch die Datenrate in der Funktechnik bisher nahezu alle zwei Jahre verdoppelt. »Im Jahr 1972 kam der erste Texas-Instruments-Rechner auf den Markt und 2007 das iPhone von Apple!«, unterstreicht Koch seine These.

ANDREAS LUNDGREN, ESO

Das Ende 2005 eingeweihte Atacama Pathfinder Experiment (Apex) in Chile untersucht den Himmel im Bereich von 0,2 bis 1,4 Terahertz. Apex soll interessante Strahlungsquellen aufspüren, die sein Nachfolger Alma, das Atacama Large Millimeter Array, ab 2010 mit größerer Auflösung untersuchen wird. Schon jetzt hilft Apex, Fragen etwa zur Entstehung junger Sterne aufzuklären. Denn infrarote Strahlung, die durch den Staub rund um Sternentstehungsregionen entkommt, wird durch die Rotverschiebung über lange Distanzen hinweg zu Submillimeterstrahlung, die von Apex detektiert werden kann.

»Der Sprung, von dem ich rede, ist deutlich kleiner.«

Erste Erfolge können die Braunschweiger jetzt vorweisen. Kleine-Ostmann habe ihm kürzlich genüsslich berichtet, dass er vor wenigen Tagen das Zeitalter der »TV-Terawelle« eingeläutet habe. Mit Terahertztechnik übertrug er ein VHS-Videosignal gut einen halben Meter weit. Auch längere Strecken seien kein Problem, erklärt Koch, weil das System ähnlich wie Richtfunk funktioniere. Mit diesem teile es sich allerdings auch einen Nachteil: Zwischen Sender und Empfänger muss freie Sicht bestehen.

Schon ein Mensch oder ein Objekt, das Terahertzwellen absorbiert, unterbricht die Verbindung. Koch denkt daher über reflektierende Tapeten für Arbeitsräume nach, um das Signal »über Bande zu spielen«. »An diesen Sachen arbeiten wir gerade«, verrät er, ebenso wie an der Reduktion der Kosten: In einigen Jahren soll die Technologie genauso preiswert sein wie Bluetooth oder WLAN.

Es gibt aber auch Anwendungsbereiche, wo die Kosten eine eher untergeordnete Rolle spielen. In der Astronomie etwa ist vor allem Zuverlässigkeit gefragt, insbesondere bei Satelliten, die, einmal ins All geschossen, sich praktisch nicht mehr warten lassen. Unter anderem, weil die irdische Lufthülle die meisten Terahertzstrahlen schluckt, ist es erst seit wenigen Jahren möglich, das Universum auch in diesem Bereich genauer unter die Lupe zu nehmen. Die dort eingesetzten empfindlichen Geräte müssen aber meist aufwändig mit Helium gekühlt werden.

Und was versprechen sich Wissenschaftler vom Blick in den Terahertzhimmel? »Wenn Sie in den klaren Nachthimmel schauen, sehen Sie das Band der Milchstraße«, erklärt DLR-Forscher Hübers. »Darin entdecken Sie ringsum dunkle Flecken. Das sind riesige Wolken oder Verklumpungen aus Staub und Molekülen.« Astronomen wollen wissen, ob sich diese weiter verdichten und daraus einmal Sterne entstehen.

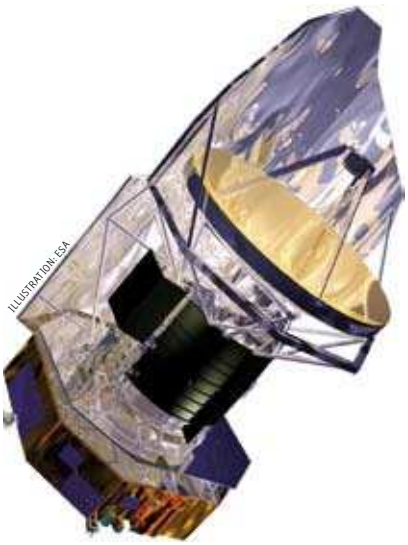
»Durch Messung der emittierten Terahertzstrahlung können wir nachweisen, welche Moleküle oder Atome dort vorhanden sind«, sagt Hübers. Alle einfach gebauten chemischen Verbindungen wie etwa Kohlenmonoxid, Wasser, OH (Hydroxidion), HCN (Cyanwasserstoff oder Blausäure) oder H_2S (Schwefelwasserstoff) besitzen Rotationsübergänge, deren Energie im Terahertzbereich liegt. Wissenschaftler sind mittlerweile in der Lage, anhand entsprechender Analysen über 100 verschiedene Stoffe zu unterscheiden. »Zudem kann man die Dichte der Staubwolken vermessen und mit Hilfe des Dopplereffekts deren Dynamik untersuchen«, erläutert Hübers.

Derzeit bauen Hübers und sein Team Terahertzgeräte für das Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy (Sofia). Das in einen Jumbo-Jet eingebaute Observatorium wird gemeinsam vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und der US-Weltraumbehörde Nasa betrieben. Ihren Jungfernflug hatte Sofia im April 2007, nach und nach wird es nun mit Komponenten bestückt. Unter anderem mit dem Terahertzempfänger Great, dem German Receiver for Astronomy at Terahertz-Frequencies: »Wir sind bei Great für den Bereich von drei bis fünf Terahertz verantwortlich«, sagt Hübers.

Spannung vor dem Start: Herschel hebt im Sommer ab

Als Detektoren werden dort spiralförmige Antennen aus Silizium eingesetzt. »Sie sind ein Spin-off unserer Forschung an Bessy, wo dieselben Instrumente im Einsatz sind«, sagt der Terahertzspezialist. Die Antennen sind durch eine mikroskopisch kleine Brücke aus supraleitendem Niob-Nitrid miteinander verbunden. Diese wird auf eine Temperatur gekühlt, bei der das normale Leitverhalten zur Supraleitung übergeht. Im Fall des Niob-Nitrids liegt diese bei etwa acht Kelvin. Trifft ein Terahertzphoton auf den so gekühlten Detektor, wird dieser zwar nur um Bruchteile eines Kelvins erwärmt. Dadurch aber ändert sich die Leitfähigkeit der Antennen abrupt und so stark, dass ein messbares Signal erzeugt wird.

Zum Kalibrieren entwickelten die DLR-Forscher einen optisch gepumpten Gaslaser. Das bringt die Terahertzastronomie nun auch andernorts voran: »So ein System haben wir nach Schweden verkauft«, sagt Hübers, »wo die Kollegen jetzt Detektoren für das Weltraumteleskop Herschel der Esa kalibrieren.« Im Sommer dieses Jahres will die europäische Weltraumagentur den Satelliten ins All schießen, um den Frequenzbereich zwischen 0,4 und 5 Terahertz zu untersuchen. Bald schon wird die Terahertzstrahlung helfen, weitere Lücken in der Erkenntnis der Weltzusammenhänge zu schließen. ◁



Der Start des europäischen Weltraumobservatoriums Herschel ist für Oktober geplant. Sein 3,5-Meter-Teleskop wird das größte sein, das je in den Weltraum abhob. Es soll kalte oder durch Staubwolken verdeckte kosmische Regionen untersuchen, die in vielen Spektralbereichen »unsichtbar« sind. Im fernen Infrarot und im Submillimeterbereich wird Herschel unter anderem tief in Sternentstehungsregionen blicken.

Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

Der Terahertz-Blick. Von S. Wietzke, F. Rutz, M. Koch in: Kunststoffe, 5/2007, S. 52
Online: www.kunststoffe.de/directlink.asp?KU103872

Terahertz technology: a land to be discovered. Von Martin Koch in: Optics and Photonics News, März 2007, S. 21

Heterodyne receiver at 2.5 THz with quantum cascade laser and hot electron bolometric mixer. Von Heinz-Wilhelm Hübers et al. in: Proceedings of SPIE, Bd. 6275, 2006, S. 62750H

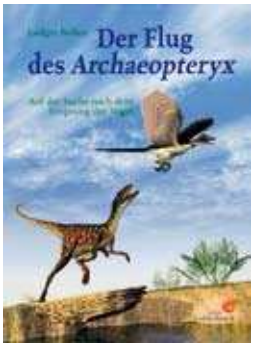
Deutsches Terahertz-Zentrum e. V.: www.terahertzcenter.de

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/943426.

PALÄONTOLOGIE

Von welchen Tieren stammen die Vögel ab?

Von den Dinosauriern, sagt die herrschende Lehrmeinung. Aber Dreh- und Angelpunkt aller Forschungen bleibt der Urvogel *Archaeopteryx*.



Als in China spektakuläre Fossilreste kleiner befiederter Dinosaurier entdeckt wurden (Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 13, und 11/2004, S. 24), freuten sich nicht nur die Paläontologen über ein neues, starkes Indiz dafür, dass die Vögel von den Dinosauriern abstammen; auch in der Öffentlichkeit lebte das Interesse an Ursprung und früher Evolution der Vögel auf. Das klassische Bindeglied, das »Missing Link« im Sinn der Darwin'schen Evolutionslehre, ist nach wie vor der geologisch älteste bekannte Vogel, der *Archaeopteryx* aus den 150 Millionen Jahre alten lithografischen Schiefern von Solnhofen in Bayern.

Bisher sind alle Bücher zu dem Urvogel zunächst auf Englisch erschienen und nur zum Teil ins Deutsche übersetzt worden. »Der Flug des *Archaeopteryx*« ist da als ursprünglich deutsches Gewächs schon eine Besonderheit, und nicht nur in dieser Hinsicht: Es ist eine unterhaltsam geschriebene, populärwissenschaftliche Darstellung des gegenwärtigen Forschungsstands auf hohem Niveau, und das, obgleich sein Autor ein Seiteneinsteiger ist. Ludger Bollen, Jahrgang 1961, hat an der Hochschule für Künste in Bremen Grafikdesign studiert und ist hauptberuflich Grafiker beim »Spiegel«, beschäftigt sich aber seit vielen Jahren mit Zoologie, Evolutionsbiologie, Paläontologie und speziell mit dem Ursprung der Vögel und der Entstehung des Vogelflugs. Mit hervorragenden Illustrationen, professioneller Grafik und einem ansprechenden Layout hat er sein Werk selbst gestaltet.

Diese Rekonstruktion des *Archaeopteryx* stammt von dem dänischen Paläontologen Gerhard Heilmann (1859–1946), dessen Theorie (»Origin of birds«, 1926) jahrzehntelang Bestand hatte.

Wie konnten sich Feder und Vogelflügel aus Strukturen entwickeln, die selbst nicht zum Flug befähigten und in dieser Hinsicht keinen Selektionsvorteil boten? Das ist die große Frage, an der sich viele Diskussionen entzündeten. Bollen schildert sie auf spannende Weise und geht dabei auch auf die Abstammungslehre Charles Darwins sowie die physikalischen Voraussetzungen und Grenzen für den Tierflug ein. Bei Formulierungen wie »schöpferischer Atem der Evolution« und »Lösungen, die die Natur ersonnen hat« muss man dem Autor zugutehalten, dass er nicht für den wissenschaftlichen Leser schreibt.

Kurzweilig erzählt Bollen die Geschichte der bisher zehn Fossilfunde des *Archaeopteryx* und ihrer wissenschaftlichen Auswertung. Es fehlen nicht die Dinosaurier, die, als »entfesselte Echsen« betitelt, eine zentrale Rolle als mögliche Vorfahren der Vögel spielen. Der Autor beschreibt in allgemein verständlicher Form die heute üblichen Methoden der kritischen Merkmalsanalyse (Kladistik), die zu den Verwandtschaftsverhältnissen zwischen Tiergruppen Indizien liefert, sowie die gängigen Hypothesen zur Physiologie, zum Wachstum und zur Flugfähigkeit des bayerischen Urvogels. Das Titelthema wird relativ kurz abgehandelt. Der Autor entschied sich hier für eine der diskutierten Interpretationen: *Archaeopteryx* war ein schlechter Flieger und nur zu kurzen, niedrigen Flatterflügen fähig.

Im Lauf der Wirbeltierevolution ist der aktive Flug mehrmals in unabhängigen Entwicklungen entstanden; Bollen erläutert das in Wort und Bild am Beispiel der Fledermäuse und der Flugsaurier. Unter dem doppelsinnigen Titel »Triebfeder der Evolution« diskutiert er die strukturellen, biomechanischen und aerodynamischen Voraussetzungen, die Vogelfeder und -flügel erfüllen müssen. Er übersetzt die Forschung zu den neuesten Fossilfunden und sogar komplizierte molekularbiologische Vorgänge, nicht nur aus dem Englischen ins Deutsche, sondern auch aus der Sprache der Wissenschaft in die Umgangssprache, und endet bei immer noch offenen Fragen: Wie ist der Vogelflug entstanden, vom Boden hinauf oder von den Bäumen herab? Wie verlief die Vogelevolution nach *Archaeopteryx*? Welche Fossilfunde geben hierüber Aufschluss? Wie überlebten die Vögel die große Aussterbewelle am Ende der Kreidezeit? Wo liegen die Wurzeln der neuzeitlichen Vögel?

Die Gliederung des Buchs ist nicht besonders logisch. Der Autor weicht zum Teil weit von seinem eigentlichen Thema ab. Das Literaturverzeichnis ist recht willkürlich zusammengestellt; es fehlen viele der Autoren, auf deren Forschungen Bezug genommen wird.

Einige sachlich unrichtige Angaben sind zu erwähnen: Das Wort »Dinosaurier« leitet sich nicht vom Lateinischen, sondern vom Griechischen ab. Das Kieferstück des Londoner *Archaeopteryx*-Exemplars stammt nicht vom Unterkiefer, sondern vom Oberkiefer. Der abgebildete Fährtenabdruck eines Flugsauriers wurde nicht in Crayssac (Frankreich), sondern in Arizona entdeckt. Die angebliche Behaarung des Flugsauriers Sordes stellte sich zum größten Teil als Fehlinterpretation heraus. Gleiches gilt für das »versteinerte Herz« des Dinosauriers *Thescelosaurus*. Fast alle Fundstellen der einzelnen *Archaeopteryx*-Exemplare sind falsch angegeben.

Insgesamt aber ist »Der Flug des *Archaeopteryx* ein schönes, interessantes und lesenswertes Buch, im besten Sinn Wissenschaftsvermittlung, und darüber hinaus noch zu einem recht günstigen Preis.

Peter Wellnhofer

Der Rezensent war in der Bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und Geologie für die Sammlung fossiler Wirbeltiere verantwortlich. Er hat zahlreiche Werke zu Flugsauriern und dem *Archaeopteryx* veröffentlicht (s. Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 12, und 1/1997, S. 23).

Ludger Bollen
Der Flug des *Archaeopteryx*
Auf der Suche nach dem Ursprung der Vögel
Quelle & Meyer, Wiebelsheim 2008.
272 Seiten, € 24,95

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Woher rührt die Überlegenheit der abendländischen Kultur?

Karl Wulff scheitert ehrenvoll an dieser Frage, die für einen Einzelmenschen zu groß ist und vielleicht keine vernünftige Antwort haben kann.

Warum sind die Naturwissenschaften – jedenfalls das, was wir heute darunter verstehen – in Europa entstanden und nicht in anderen hoch entwickelten Kulturen? Karl Wulff hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, dieser Frage auf den Grund zu gehen. Da heben sich schon vorab die kritischen Augenbrauen: Eigentlich ist diese große Frage falsch gestellt, denn sie überträgt in unzulässiger Weise das kausale Schema in Bereiche, die diesem verschlossen sind. Und sie erfordert so universell, wie sie gestellt ist, Kompetenzen in sehr vielen Bereichen, die eine Einzelperson niemals einbringen kann.

Aber lassen wir die Fundamentalkritik beiseite. Wulff, der nach seinem Berufsleben als Chemiker in Forschung, Entwicklung und Management noch Sinologie, Wissenschaftsgeschichte und Philosophie studierte, behandelt in seinem Buch drei Kulturen: die griechische Antike nebst ihrem Erbe, dem christlichen Abendland, bis hin zur so genannten wissenschaftlichen Revolution, China bis etwa 1750 und – recht kurz und reichlich eurozentrisch – den islamischen Raum im Mittelalter. Im Sinn seines Anliegens geht der Verfasser breit auf Geografie und Geschichte, Sprache und Philosophie, Gesellschaft und vieles mehr ein.

Hier lernt man manches Interessante, etwa zur Struktur der klassischen chinesischen Sprache, zum Verhältnis von Religion und Recht im Islam, aber auch zur Rezeption des Euklid in China, bei der die Jesuiten im 16. und 17. Jahrhundert eine wichtige Rolle spielten. Das eigentliche Ziel gerät dabei aus dem Blick; oft bleibt unklar, was die Ausführungen zur Klärung der Grundfrage beitragen.

So widmet der Verfasser etwa 80 durchaus lesenswerte Seiten einer Geschichte des chinesischen Denkens, aber nur 20 Seiten der chinesischen Naturforschung und Mathematik. Problematisch ist auch, dass der verengte Blick auf die Kulturgeschichte wesentliche Faktoren wie Ökonomie und Technik fast vollständig ausblendet.

Aus der griechischen Antike hebt Wulff die Entstehung der beweisenden Mathematik, insbesondere der Geometrie, hervor, wie wir sie in Euklids »Elementen« (um 300 v. Chr.) antreffen, sowie in der Folge die Herausbildung eines geometrischen Weltbilds in der Astronomie, das für uns mit dem Namen von Klaudios Ptolemaios (1. Jh.) verknüpft ist. Dagegen sei die chinesische Mathematik weit gehend auf das Praktische und damit hauptsächlich auf das Rechnen und die Arithmetik beschränkt geblieben.

Während die Gesellschaft des antiken Griechenlands kompetitiv und argumentativ war, lag der chinesischen die Idee der Kooperation im Rahmen einer starren Ordnung mit ihren Autoritäten zu Grunde; die geografische Situation Griechenlands erzwang geradezu die Wirkung nach außen, wohingegen diejenige Chinas den Abschluss und die Konzentration nach innen begünstigte.

Das Fehlen einer Grammatik in der klassischen chinesischen Sprache war der Abstraktion abträglich im Gegensatz zum Griechischen und Lateinischen, welche ja noch im Gymnasium des 20. Jahrhunderts als die Schulung logischen Denkens schlechthin galten. So etwa die Argumentationsmuster des Autors.

Den zweiten wichtigen Unterschied zum islamischen und chinesischen Raum macht Wulff in der Entstehung der Universitäten im europäischen Mittelalter fest. Diese Institution, die kein Pendant in den zum Vergleich herangezogenen Kulturen hatte, lieferte den Rahmen, der eine Professionalisierung der wissenschaftlichen Forschung im größeren Umfang möglich machte. Im Unterschied zum Islam, so eine weitere These, gelang es hier, religiöses Denken und Vernunftgebrauch weit gehend in Einklang zu bringen – von bekannten Ausnahmen natürlich abgesehen.

Das Buch bietet eine beeindruckende Fülle von Informationen besonders zur chinesischen Kultur. Allerdings sind diese fast ausschließlich der Sekundärliteratur entnommen; manches ist kritikwürdig und wird von anderen Autoren möglicherweise ganz anders gesehen. Die Darstellung der mathematischen Aspekte lässt hinsichtlich Zuverlässigkeit und Korrektheit erheblich zu wünschen übrig; das weckt die Befürchtung, es könnte in anderen, mir nicht so vertrauten Bereichen ähnlich sein. Über weite Strecken liest sich das Werk wie ein Schulbuch.

Der beachtliche Faktenberg gebärt schließlich eine recht bescheidene Schlussfolgerung, die zudem nicht gerade neu ist: Die beweisende Mathematik, in Sonderheit die Geometrie, und die Struktur der Universitäten waren es, die das Besondere des europäischen Abendlandes ausmachten. Ihnen verdankt die moderne Naturwissenschaft ihr Dasein.

Bezüglich der zentralen Fragestellung enttäuscht das Buch; Gewinn daraus ziehen könnte vor allem der Leser, der an der Kulturgeschichte Chinas oder – mit Einschränkungen – der islamischen Länder interessiert ist.

Klaus Volkert

Der Rezensent ist Professor für Didaktik der Mathematik an der Universität zu Köln.

Karl Wulff
Naturwissenschaften im Kulturvergleich
Europa – Islam – China
Harri Deutsch, Frankfurt am Main 2006.
408 Seiten, € 36,–

Auf Deutsch erschienen

DOUGLAS R. HOFSTADTER

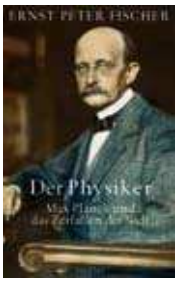
Ich bin eine seltsame Schleife

Aus dem Amerikanischen von Susanne Held.
Klett-Cotta, Stuttgart 2008. 532 Seiten, € 29,50

ist die deutsche Version von »I am a strange loop« (Spektrum der Wissenschaft 9/2007, S. 93).

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Das Zerfallen einer Biografie



Ernst Peter Fischer versucht sich an einer umfassenden Würdigung von Leben und Werk des großen Physikers Max Planck.

Planck-Konstante, Planck'sche Strahlungskurve, Max-Planck-Gesellschaft – das wissenschaftliche Vermächtnis des großen Physikers ist weitaus bekannter als die Geschichte seines Lebens, das fast neun Jahrzehnte voller dramatischer Entwicklungen überspannt: In Max Plancks Geburtsjahr 1858 war von flächendeckender Elektrifizierung noch nicht die Rede; als er 1947 starb, hatte das Atomzeitalter bereits begonnen.

Im Gegensatz zum Weltbürger und Nonkonformisten Albert Einstein taugt der preußische Professor nicht recht zum Popidol der Wissenschaft. Plancks Karriere verlief in geordneten Bahnen, und seine Forschungen waren ebenso wie sein wissenschaftspolitisches Wirken geprägt von Pflichtgefühl und Gründlichkeit.

Die biografische Literatur über Planck ist daher eher spärlich. Die aktuellste umfangreiche Würdigung seines Lebens ist schon über zwanzig Jahre alt und stammt – wie so oft, wenn es um deutsche Physiker des 20. Jahrhunderts geht – von einem Amerikaner, in diesem Fall dem Wissenschaftshistoriker John Heilbron.

Zum 150. Geburtstag 2008 wird es jedoch sicher nicht an entsprechenden Publikationen fehlen. Den Reigen eröffnet der umtriebige Wissenschaftspublizist Ernst Peter Fischer (»Die andere Bildung«), der – so die Verlagsankündigung – »die erste umfassende Biographie des Nobelpreisträgers« vorlegt.

Doch das Werk hält nicht, was es so vollmundig verspricht. Fischer bietet vielmehr biografische, historische und populärwissenschaftliche Versatzstücke, angereichert mit eigenen Spekulationen zu Themen, die er in anderen Büchern ausführlicher behandelt hat und hier nur andeuten kann. Beispiele sind die »aufschimmernde Nachtseite der Wissenschaft«, gemeint: das psychologische Fundament der Forschung, und Parallelen zwischen Kunst und Wissenschaft.

Immerhin räumt Fischer der Physik des ausgehenden 19. und des beginnenden 20. Jahrhunderts viel Platz ein. Doch zahlreiche Vorgriffe, Einschübe und Exkurse (»... bei allen Abschweifungen dürfen wir nicht das eigentliche Ziel aus dem Auge verlieren«, S. 112) haben mir das Lesen etwas verleidet. So wird nicht recht nachvollziehbar, warum die Vorstellung, Licht bestehe aus diskreten Quanten, damals so abstrus war, dass Planck selbst sie nur in einem »Akt der Verzweiflung« akzeptieren mochte: Nichts anderes war ihm eingefallen, um die Beobachtungen konsistent zu erklären. Fischer dagegen bietet statt einer historischen Rekonstruktion eher den heutigen Blick.

Plancks Physik, insbesondere die theoretische Thermodynamik, ist zudem höchst anspruchsvoll. Gerade deswegen wäre eine Popularisierung, die auch die damalige Perspektive verständlich macht, mehr als verdienstvoll gewesen. Doch können Leser, die von Fischers ausführlicher Erklärung der Potenzschreibweise für besonders kleine und große Zahlen profitieren, auch etwas mit der vertrackten Geschichte von Wärme, Energie, Strahlung und Quanten anfangen?

Fischer behandelt zahlreiche Aspekte, die für Plancks Leben und Werk eine Rolle spielen, doch allzu vieles steht nur nebeneinander. So entsteht zwar eine wissenschaftshistorische Materialsammlung, aber noch keine dicht erzählte Lebensbeschreibung, die ein vollständiges Bild von Plancks zunächst spröde erscheinender Persönlichkeit vermitteln könnte. Die oft schwärmerische Verehrung, die Planck von vielen seiner Kolleginnen und Kollegen entgegengebracht wurde, klingt für heutige Ohren ungewohnt. Fischer Buch hat mir jedoch keine neue und moderne Sicht auf Plancks Persönlichkeit eröffnet.

Viele Nachlässigkeiten machen den Eindruck, das Buch sei der Lektorin zu früh aus

ZOOLOGIE

Tierische Anekdoten

Die Realität kann seltsamer als die Fantasie sein, »stranger than fiction«. Das gilt auch für die Tierwelt. Frösche nutzen Baumhöhlen als Resonanzraum für eindrucksvolleres Quaken, Hirsche legen Parfüm auf, indem sie in den Schlamm pinkeln und sich in der Mischung wälzen, Otter rodeln auf dem Bauch schneebedeckte Hänge hinunter. Der britische Wissenschaftsjournalist Augustus Brown hat in seinem Buch allerlei zoologische Skurrilitäten dieser Art versammelt.

Bei diesem Thema sollte niemand wissenschaftlichen Anspruch erwarten. Aber ein roter Faden wäre trotzdem hilfreich gewesen. Nur locker sind die Geschichtchen zu Kapiteln zusammengefasst, wie »Sex im Tierreich« oder »Die elegantesten Fortbewegungsarten der Natur«.

Über eine Aneinanderreihung von Anekdoten kommt Brown nicht hinaus. Jedes Phänomen handelt er in wenigen Zeilen ab. Zuweilen liest man Sätze wie: »Schwertwale verständigen sich in verschiedenen Dialekten miteinander.« Keine Erklärung, keinerlei Details, Punkt, Absatz – und weiter geht es mit pfeifenden Delfinen.

Es ist schade, wie Brown interessante Themen so leichtfertig verschenkt. Denn an Material mangelt es ihm nicht, eine beeindruckende Fülle an Informationen hat er zusammengetragen. Mit ein bisschen Hintergrund versehen und zu zusammenhängenden Texten verknüpft hätte ein nettes Buch daraus werden können. So aber taugt das Werk zu nicht viel mehr als zum Aufstocken des Smalltalk-Repertoires.

Malte Jessl

Der Rezensent ist Diplombiologe und freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

Augustus Brown
Warum Pandas Handstand machen
... und andere Merkwürdigkeiten aus dem Reich der Tiere
Aus dem Englischen von Hainer Kober.
Ullstein, Berlin 2007. 256 Seiten, € 14,–

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

den Händen gerissen worden; denn es enthält unnötige Doppelungen (so wird innerhalb von nur zehn Seiten zweimal ausführlich dieselbe Planck-Anekdote erzählt), Bildnachweise führen ins Leere oder zur falschen Seite, und in den Literaturhinweisen ist offensichtlich Text stehen geblieben, der gestrichen werden sollte. Statt den einzelnen Literaturangaben kurze, hilfreiche Erläuterungen folgen zu lassen, bettet Fischer diese in einen zusammenhängenden Text ein. Dennoch verschweigt er einiges, zum Beispiel die zweite Auflage des Planck-Buchs von John Heilbron (englisch 2000, deutsch 2006). Die trägt interessante neuere Quellen nach, die kein sonderlich schmeichelhaftes Licht auf Plancks Wirken im Dritten Reich werfen. Auch dass die Planck-Biografie von Hans Hartmann erstmals 1938 erschien, bleibt unerwähnt, obwohl es zeitgeschichtlich durchaus relevant ist.

Der größte Mangel ist jedoch, dass Fischer allzu sehr auf der gängigen Sekundärliteratur aufbaut. Schon recht: Eine populäre Lebensschilderung kann sich nicht als detailversessene Quellenarbeit präsentieren, aber sie sollte ein so spannendes Dokument wie das Brieftagebuch, das Planck mit drei seiner Kommilitonen aus der Münchner Zeit über fast vier Jahrzehnte führte, nicht gänzlich unerwähnt lassen.

Plancks Lebensumstände machen es seinen Biografen nicht leicht. Ein Großteil seiner wissenschaftlichen und persönlichen Aufzeichnungen ist der Schlussphase des Zweiten Weltkriegs zum Opfer gefallen. Doch auch in jüngster Zeit sind neue Quellen erschlossen worden, zum Beispiel der Briefwechsel mit Wilhelm Wien, mit dem ihn trotz großer weltanschaulicher Differenzen ein enges kollegiales Verhältnis verband.

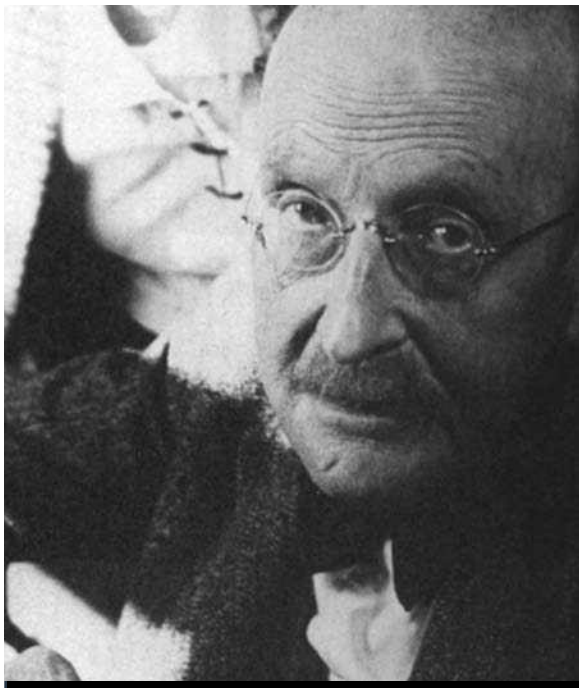
Herausgekommen ist ein Werk, das unentschieden zwischen Biografie und Sachbuch hin- und herpendelt. Zudem hätte das meiste so auch bereits vor zwanzig Jahren geschrieben werden können.

Eine verpasste Gelegenheit; schade.

Alexander Pawlak

Der Rezensent ist Diplomphysiker und Redakteur beim »Physik Journal« in Weinheim.

Ernst Peter Fischer
Der Physiker
Max Planck und das Zerfallen der Welt
Siedler, München 2007. 352 Seiten, € 22,95



Als 88-Jähriger war Max Planck entscheidend an der Wiederbelebung der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft beteiligt, die 1946 unter dem Namen »Max-Planck-Gesellschaft« neu gegründet wurde.

Exklusiv für Abonnenten

Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer unter **www.spektrum-plus.de** Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:

Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Urwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg.

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie erwartet!

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

www.spektrum-plus.de

VORSCHAU

Heft Mai 2008
ab 29. April im Handel

Ende der Kosmologie?

Die beschleunigte Expansion des Universums sorgt dafür, dass der Kosmos allmählich die Spuren seiner eigenen Herkunft verwischt. Sind bereits Informationen verloren gegangen?

PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

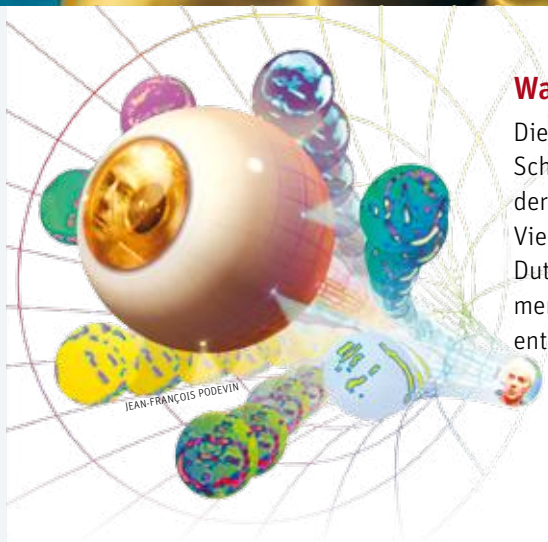
WEITERE THEMEN IM MAI

Planck und Einstein

Max Planck wird als Begründer der Quantenphysik gefeiert. Seine Beziehung zu Einstein ist weniger bekannt

Kultur am Wüstenrand

Vor Jahrtausenden bildeten Wüstenrandzonen bei Klimaänderungen Brennpunkte der Kulturentwicklung – im Niltal wie in Peru



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Was die Netzhaut alles kann

Die Zellen der Retina sind nicht nur Schaltstationen, die simple Abbilder der Welt an das Gehirn übermitteln. Vielmehr liefern sie gleichsam ein Dutzend Filmspuren, die erst zusammen die komplette Bildinformation enthalten

Rutschgefährdete Eispanzer

Statt langsam zu schmelzen, könnten die polaren Eisdecken vorher schon ins Meer rutschen. Der Grund: Schmelzwasser unter dem Eis wirkt fatalerweise als Schmiermittel

SEBASTIAN COPELAND, WWW.ANTARCTICABOOK.COM

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter